

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

**Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Michal Gult

2012

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301 - Strojní inženýrství

Strojírenská technologie
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Zjišťování mezních stavů deformace bezkontaktním systémem ARAMIS

Determination of Deformation Limit States by Contactless System Aramis.

Bc. Michal Gult

KSP – TP –

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. – TU v Liberci

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	72
Počet tabulek	06
Počet obrázků	62
Počet vzorců	17

Datum: 25. 5. 2012

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: M2301 - Strojní inženýrství

Student: Bc. Michal Gult

Téma práce: **Zjišťování mezních stavů deformace bezkontaktním systémem ARAMIS**

Determination of Deformation Limit States by Contactless System Aramis.

Číslo DP: KSP – TP –

Vedoucí DP: Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. – TU v Liberci

Konzultant DP: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. – TU v Liberci

Abstrakt:

Diplomová práce se zabývá zjišťováním mezních stavů deformace bezkontaktním optickým systémem Aramis. Teoretická část obsahuje seznámení s optickými systémy pro analýzu deformace. A dále diagramy mezních přetvoření (DMP) spolu s některými technologickými zkouškami. Experimentální část práce nejprve zjišťuje DMP dle normy ISO/DIS 12004-2 pomocí hydraulického dvojčinného lisu. Jako druhý způsob pro určení DMP bylo použito zařízení pro stanovení hlubokotažnosti. Pro obě metody byl použit stejný hlubokotažný ocelový plech. Cílem práce je porovnání výsledků měření z obou použitých metod.

Abstract:

This thesis deals with the determinate deformation limit states by Aramis contactless optical system. The theoretical part consists of an introduction into optical systems for the measurement of deformation. Furthermore it contains the forming limit diagrams (FLD) together with some technology tests. An experimental part of this thesis at first determines FLD according to ISO / DIS 12004-2 by means of double-action hydraulic press. As a second method for FLD determination was used device for deep-drawability determinate. The same deep-drawing steel sheet was used for both methods. The aim of the thesis is to compare the results from both used measurement methods.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2012

.....
Bc. Michal Gult
Velké Poříčí 176
549 32 Velké Poříčí

Poděkování

Velmi rád bych tímto poděkoval vedoucímu a konzultantovi mé diplomové práce Ing. Pavlu Solfronkovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné připomínky a za poskytnutí podkladů při vypracování zvoleného tématu. Dále bych poděkoval ostatním pracovníkům Katedry strojírenské technologie z Oddělení tváření kovů a plastů za poskytnutou pomoc, cenné rady a informace.

Na konec bych chtěl poděkovat mým rodičům za trpělivost a podporu během celého mého studia.

Bc. Michal Gult



OBSAH

1. ÚVOD	- 10 -
2. TEORETICKÁ ČÁST	- 11 -
2.1. Plechy používané při konstrukci karosérií	- 11 -
2.1.1. IF oceli bez intersticií	- 12 -
2.1.2. IF oceli vykazující BH efekt	- 12 -
2.2. Optické metody měření	- 13 -
2.3. Měření deformací pomocí optických systémů od firmy GOM	- 14 -
2.3.1. TRITOP DEF	- 14 -
2.3.2. ATOS	- 15 -
2.3.3. ARAMIS	- 15 -
2.3.4. PONTOS	- 18 -
2.3.5. ARGUS	- 19 -
2.4. Diagram mezních přetvoření	- 20 -
2.4.1. Určování DMP početními metodami	- 24 -
2.4.2. Určování DMP experimentálním způsobem	- 24 -
2.4.3. Faktory ovlivňující DMP	- 27 -
2.5. Technologické zkoušky kovů	- 27 -
2.5.1. Zkouška kombinovaná	- 28 -
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 31 -
3.1. Použitý materiál	- 31 -
3.1.1. Statická zkouška tahem	- 32 -
3.1.2. Aplikace a vlastnosti použitého materiálu	- 34 -
3.2. Příprava a kalibrace optického měřicího systému Aramis	- 34 -
3.3. Diagramy mezních přetvoření dle normy	- 35 -
3.3.1. Příprava zkušebních vzorků a měření DMP	- 36 -
3.3.2. Vyhodnocení měření	- 38 -
3.3.3. Tvorba DMP dle normy ISO/DIS 12004-2	- 42 -
3.3.4. Bulge test	- 46 -
3.3.5. Posun tažníku	- 48 -
3.3.6. Výsledný DMP	- 49 -



3.4. Diagram mezních přetvoření zjišťovaný pomocí zařízení pro určování hlubokotažnosti (TZP)	- 51 -
3.4.1. Příprava zkušebních vzorků	- 52 -
3.4.2. Příprava zkušebního zařízení a měření DMP	- 53 -
3.4.3. Vyhodnocení měření	- 56 -
3.4.4. Postup získání dat pro sestrojení DMP	- 59 -
3.4.5. Posun tažníku	- 63 -
3.4.6. Výsledný DMP	- 64 -
4. DISKUSE A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	- 66 -
5. ZÁVĚR.....	- 69 -
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 71 -



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$A_{80\text{ mm}}$	%	tažnost
b	mm	šířka zkušebních těles
BH		zvýšení meze kluzu při vypalování laku
C	MPa	koeficient monotónního zpevnění
CAD		computer aided design
D	mm	průměr zkušebních těles
DMP		diagram mezních přetvoření
F_P	N	maximální tažná síla
F_T	N	tažná síla
FLC		forming limit curve
FLD		forming limit diagram
KMP		křivka mezního přetvoření
m	-	citlivost materiálu na rychlost deformace
m_σ	-	ukazatel stavu napjatosti
m_φ	-	ukazatel stavu přetvoření
n	-	exponent deformačního zpevnění
r	-	koeficient normálové anizotropie
PC		osobní počítač (Personal Computer)
ppm		počet částic na 1 milion částic
R_e	MPa	mez kluzu
R_m	MPa	meze pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
s	-	výběrová směrodatná odchylka
t	mm	parametr zeslabení (tloušťka)
T	-	ukazatel tvárnosti
TZP		tiefziehprüfung
v	mm.s ⁻¹	rychlost
w	-	počet bodů
x_s	-	směrově střední hodnota
\bar{x}	-	střední hodnota výběru
σ	MPa	skutečné napětí
φ	-	přetvoření



φ_1	-	hlavní přetvoření
φ_{1m}	-	průměrná hodnota krajních bodů φ_1
φ_2	-	vedlejší přetvoření
φ_{2m}	-	průměrná hodnota krajních bodů φ_2
φ_{ik}	-	kritické mezní přetvoření



1. ÚVOD

Mezi jednu z nejrozšířenějších technologií plošného tváření bezesporu patří tažení. Touto technologií vzniká z plechů prostorový výlisek. V praxi, při návrhu výrobní operace před samotnou výrobou nástrojů, je potřeba s dostatečnou přesností říci, zda bude požadovaný tvar výlisku vyrobitelný. K tomuto by nám měly dostatečně napovědět výsledky z technologických zkoušek. Jednou ze spolehlivých metod zjištění charakteristických vlastností materiálu jsou diagramy mezních přetvoření (DMP). Tyto diagramy nám charakterizují deformační chování plechů při různých stavech napjatosti. Diagramy nám také vymezí oblast bezpečného tváření, dále nám pomohou ve volbě vhodného materiálu a konečného tvaru výlisku. Toto zkoumání přímo souvisí se snižováním ceny konečného výrobku, neboť by se tímto mělo předejít mnohým chybám, které by se bez těchto znalostí mohly vyskytnout. Diagramy mezních přetvoření se dají získat experimentálním, ale i početním způsobem. V této práci bude předveden právě experimentální způsob. Pro jeho získávání bude použit optický bezkontaktní měřicí systém Aramis.

Trendem poslední doby je stále častější používání optických měřicích bezkontaktních systémů. Tyto systémy umožňují velmi přesné měření všech veličin celého tvářecího procesu. Mezi jejich výhody lze zařadit rychlost vyhodnocování, jednoduché porovnání různých měření a samozřejmě flexibilitu.

Cílem této diplomové práce bylo porovnání dvou metod zjišťování mezních stavů deformace optickým bezkontaktním systémem Aramis. V prvním případě se jednalo o metodu určenou normou ISO/DIS 12004-2. V druhém případě se jednalo o metodu měření DMP na zařízení pro stanovení hlubokotažnosti (TZP). Materiál zkoušeného plechu byl pro obě metody stejný.

V závěru práce bude předloženo vzájemné porovnání výsledků měření z obou použitých metod a konečné zhodnocení použitelnosti takového zkoušení do budoucna.

Příprava zkušebních vzorků byla provedena v dílnách Katedry strojírenské technologie, vlastní měření proběhlo jak v dílnách, tak v prostorech laboratoří Katedry strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci.

Diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže 2822.



2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Plechy používané při konstrukci karosérií [1],[2],[3]

V automobilovém průmyslu jsou stále vyšší požadavky na snižování spotřeby pohonných hmot a snižování emisí výfukových plynů a jejich dopad na životní prostředí. Z tohoto důvodu je snaha snižovat hmotnost karoserie. Oproti tomu se ale klade velký důraz na zvýšení bezpečnosti pasažérů. Z toho vyplývá, že je potřeba používat materiály, které mají vysoké mechanické vlastnosti, ale i dostatečně vysokou tažnost vzhledem k tvarově složitým dílům. Tyto vlastnosti jsou ale protichůdné, proto je vývoj plechů orientován tak, aby splnil výhodný poměr mezi pevností a tažností. V neposlední řadě je potřeba při vývoji plechů dbát na požadavky, mezi které patří zaručená povrchová jakost, dobrá korozní odolnost, recyklovatelnost a snížení celkových výrobních nákladů.

Na obr. 2.1.1. je uveden přehled ocelí používaných v automobilovém průmyslu. Dále bude uveden jen stručný přehled ocelí používaných při stavbě karoserie, podrobněji popsáno např. v [1].

Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněné hliníkem:

- plechy běžné kvality CQ (Commercial Quality),
- tažné DQ (Drawing Quality),
- hlubokotažné DDQ (Deep Drawing Quality),
- zvlášť hlubokotažné EDDQ (Extra Deep Drawing Quality),
- super hlubokotažné EDDQ - S (Extra Deep Drawing Quality – Super).

Pevnostní oceli:

- plechy z IF ocelí bez intersticií,
- plechy z IF ocelí vykazující BH efekt.



Vysokopevnostní oceli:

- plechy z DP ocelí,
- plechy z TRIP ocelí,
- plechy z TWIP ocelí,
- plechy z CP ocelí,
- plechy z MS ocelí.

Jelikož použitý materiál v experimentální části této práce spadá do skupiny pevnostních ocelí (IF ocelí bez intersticií), tak zde bude podrobněji popsán.

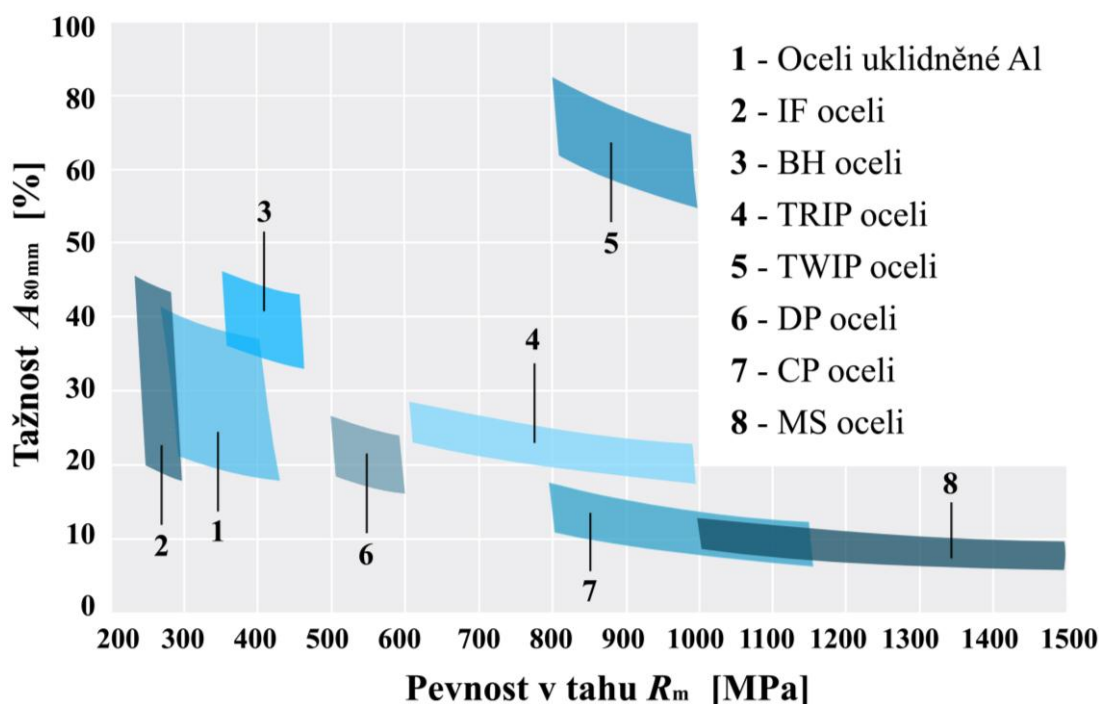
2.1.1. IF oceli bez intersticií

Tyto oceli se uplatňují hlavně v automobilovém průmyslu při stavbě karoserie a především na tvarově složité díly. Mají velmi dobrou tváritelnost, nízkou nevýraznou mez kluzu, ale také poměrně nízkou mez pevnosti ($R_{p0,2}$ do 200 MPa; R_m do 300 MPa). Dobrá tváritelnost je dána vysokým koeficientem normálové anizotropie $r > 2$ [-] a exponentem deformačního zpevnění $n > 0,25$ [-]. Vyznačují se velmi nízkým obsahem intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku v tuhé fázi. Jsou legované prvky (Al, Ti, Nb), tyto prvky na sebe vážou uhlík a dusík, čímž vznikají nitridy a karbidy. Obsah volného dusíku a uhlíku je udáván v ppm (přibližný výskyt je 10 atomů C, N v 1 000 000 atomů Fe). Odolávají deformačnímu stárnutí jak při vypalování laku, tak při žárovém zinkování.

2.1.2. IF oceli vykazující BH efekt

IF oceli s BH (Bake Hardening) efektem se používají rovněž v automobilovém průmyslu, převážně však na výrobu vnějších dílů. Mezi nevýhodu klasických IF ocelí patří nízká mez kluzu. Proto byly vyvinuty IF oceli vykazující BH efekt. Jde o jev, který spočívá v navýšení meze kluzu při teplotě vypalování laku karoserie. Velikost zpevnění závisí na obsahu uhlíku, manganu a síry. Závisí také na historii tváření. Mez kluzu může být navýšena o 30 až 80 MPa. Z hlediska BH efektu se rozlišují dva typy ocelí pro výrobu plechů:

- oceli se zvýšeným obsahem titanu respektive niobu,
- oceli se zvýšeným obsahem uhlíku.



Obr. 2.1.1. Přehled ocelí podle závislosti tažnosti na pevnosti v tahu,
vypracováno podle mechanických vlastností materiálů uvedených v [1].

2.2. Optické metody měření [4],[5], [6]

Fotogrammetrie se zabývá rekonstrukcí tvarů, měřením rozměrů a určováním polohy předmětů, které jsou zobrazeny na vyfotografovaných snímcích. Obecněji lze fotogrametrii definovat jako vědní obor, který se zabývá zpracováním informací na fotografických snímcích.

Proto se stala fotogrammetrie základním principem optických měřicích systémů. Její metody jsou nepřímé způsoby získávání informací o tvaru a poloze objektu. Informace lze získávat podle potřeby z jedné nebo z více fotografií na základě exaktního měření. Optické metody měření (fotogrametrii) lze využít všude, kde je možnost požadovaný objekt vyfotografovat a následně vyhodnotit.

Fotogrametrii lze dělit podle různých kritérií jako např. podle počtu snímků pořízených současně, podle stylu pořízení a vyhodnocení snímků nebo podle časové dostupnosti snímků. Dále je uvedeno rozdělení právě podle časové dostupnosti:

- Offline – jedná se o sekvenční snímkování, vyhodnocení je časově nebo prostorově odděleno.
- Online – provádí se simultánním snímáním více snímků a bezprostředním vyhodnocením snímků. Kamery jsou většinou přímo připojeny k počítači.
- Real time – snímání a vyhodnocení jednoho snímku v reálném čase. Frekvence snímání koresponduje s frekvencí změny (deformace, pohyb) snímaného objektu.

2.3. Měření deformací pomocí optických systémů od firmy GOM [7],[8]

Jeden z předních světových výrobců optických měřících systémů je německá firma GOM. Optické měřící systémy se staly plnohodnotným nástrojem v mnoha průmyslových odvětvích. Naměřená data z těchto GOM měřících systémů jsou nepostradatelným pomocníkem v oblasti zkoumání vlastností nových materiálů, přípravě výroby, ve výrobě prototypů, kontrole a měření. Je možno měřit statické i dynamické děje v reálném čase. Měření rozměrových veličin se používá při tvorbě CAD modelů a digitalizaci objektů. Po naměření kinematických veličin lze zjistit deformační chování, stav napjatosti a dimenzování součástí. Firma GOM má v sortimentu několik bezkontaktních měřících systémů, mezi nejznámější se řadí systém ARAMIS, PONTOS a ARGUS, dále pak 3D skenery TRITOP DEF a ATOS. V následujících kapitolách budou všechny tyto jmenované měřící systémy popsány.

2.3.1. TRITOP DEF [9]

Systém Tritop Def patří mezi přenosné optické systémy, které jsou určeny k bezkontaktnímu měření polohy diskrétních bodů (viz. obr. 2.3.1.1). Ze získaných informací je schopen vypočítat 3D posunutí a deformaci měřených objektů. Jednou z výhod oproti konvenčním měřícím systémům je fakt, že se zaznamenává posunutí a deformace bez kabeláže, senzorů a bez zasahování do měřeného objektu.



Obr. 2.3.1.1. Příslušenství 3D skeneru TRITOP DEF.

2.3.2. ATOS [9]

Atos je mobilní bezdotykový optický 3D skener (viz. obr. 2.3.2.1.). Mezi jeho výhody se řadí vysoká výkonnost, velké rozlišení a široká flexibilita měřících objemů. Příkladem použití tohoto skeneru může být např. skenování poškozených tvarových vložek a celých sestav lisovacích nástrojů a vstřikovacích forem, dále pak měření reálných objektů a jejich následné srovnání s teoretickým modelem v oblasti CAD.



Obr. 2.3.2.1. 3D skener ATOS.

2.3.3. ARAMIS [7], [10], [11]

Měřicímu systému Aramis se v této kapitole budeme věnovat podrobněji a to z toho důvodu, že bude využit k měření v experimentální části této diplomové práce.

Bezkontaktní měřicí systém Aramis se používá pro měření reálných 3D deformací. Měření může být spouštěno dvěma způsoby a to buď externím signálem (např. ze zatěžovacího stroje), nebo v pravidelných časových intervalech. Výstupem



z měření je barevná mapa rozložení deformací na měřeném objektu. Při měření rotačních objektů je možnost propojit více systémů Aramis do jednoho měřicího systému.

Systém Aramis využívá ke snímkování dvě kamery (viz. obr. 2.3.3.1. a obr. 2.3.3.2.), a proto se jedná o stereografický (dvousnímkový) měřicí systém, pomocí tohoto nám je poskytnut prostorový obraz.

Mezi přednosti systému patří velký rozsah měření velikosti objektů (od 1 mm do 1000 mm), rozsah měření deformace (od 0,05 % až do stovek %), jednoduchá a rychlá příprava vzorků, vysoká hustota naměřených dat, grafická vizualizace naměřených dat, mobilita a flexibilita.

Princip měření systému Aramis spočívá ve snímání deformační sítě (tzv. patternu), která musí být nanесena na snímaný vzorek. Nanášení deformační sítě se provádí pomocí spreje a musí být dostatečně kontrastní. Tato deformační síť se liší od běžně používaných sítí a její vzhled souvisí se způsobem vyhodnocování. Systém porovnává odpovídající si body v jednotlivých úrovních zatížení. Z tohoto porovnání je schopen vypočítat 3D posuvy, 3D deformace a tvar deformovaného objektu. Analýza deformace vychází z posuvu tzv. fazetek. Měřicí systém Aramis rozdělí deformační síť na jednotlivé fazetky, v nich se pak měří poměr plochy černé a bílé barvy, podle tohoto poměru jim pak systém přiřadí stupeň šedi. Fazetky na vzorku se překrývají z důvodu spojitosti měření (doporučené překrytí je cca. 30%). Nanесení deformační sítě bílou a černou barvou musí být provedeno zcela náhodně. Na deformační síti by neměla vznikat velká bílá místa a také ani větší černá místa.

Před samotným měřením je nutné kalibrovat měřicí systém a to z toho důvodu, že kamery nemají automatické zaostřování. K tomuto účelu slouží speciální kalibrační destička (obr. 3.2.1.), která je opatřena souřadným systémem a tzv. kalibračními body. Před samotnou kalibrací nainstalujeme kamery před zkušební vzorek. Kalibrace probíhá tak, že destičku držíme mezi kamerami a zkušebním vzorkem. Dále s ní otáčíme a měníme polohu podle pokynů měřicího systému. Po tomto by měla být kalibrace systému úplná. Postup a popis jednotlivých kroků samotné kalibrace bude podrobněji popsán v experimentální části v kapitole 3.2.

Aby mohl být obraz zpracován, tak by se měl zkušební vzorek nacházet v kalibračním objemu, který vytvoří právě dvojice kamer. Tím se rozumí, že snímané body, které se dostanou během měření mimo kalibrační objem nelze později použít pro výpočet. Děj se zaznamenává podle předem nastavené frekvence snímkování.



Naměřená data se ukládají přes řídicí trigger do PC. Vyhodnocení měření se provede pomocí vhodného softwaru. Požadované měřené veličiny získáme právě pomocí softwaru, který je schopen vyhodnotit polohu a posunutí jednotlivých fazetek na povrchu zkušební vzorku, dále pak dopočítá rychlost a zrychlení v každém časovém úseku.

Výstupem z měření lze ještě získat 3D deformace na povrchu objektu (Mises, Tresca strain), hodnoty hlavních a vedlejších deformací (Major, Minor strain), tvar měřeného objektu v jednotlivých fázích deformace, velikost deformace vůči limitní tvářecí křivce (KMP) a hodnoty změny tloušťky materiálu.

Rozdělení měřících systémů Aramis:

Optické měřící systémy ARAMIS lze rozdělit podle rozlišení a snímací frekvence na čtyři typy:

- **Aramis 4M** je určen převážně pro měření deformací, kde je zapotřebí vysoké rozlišení i vysoká rychlost kamer. U tohoto typu lze dosáhnout vzorkovací frekvence 55 Hz za plného rozlišení, případně až 440 Hz při zmenšeném rozlišení čipu v jednom směru. Je možné snímat středně rychlé děje při vysokém rozlišení.
- **Aramis 5M** disponuje vyšším rozlišením CCD čipu (5 000 000 bodů), který je vhodný pro měření velkých objektů nebo pro měření s vyšším rozlišením detailů. Snímací frekvence je 15 Hz při plném rozlišení, nebo až 30 Hz při zmenšeném rozlišení.
- **Aramis 12M** se pyšní nejvyšším rozlišením CCD čipu, proto je vhodný k měření lokálních deformací s velmi vysokou přesností. Kamery snímají frekvencí 24 Hz při plném rozlišení, nebo až 384 Hz při sníženém rozlišení. U tohoto modelu je možné redukovat rozlišení čipu v obou směrech.
- **Aramis HS** je navržený pro měření velmi rychlých dynamických dějů. Rozlišení CCD čipu je 1 300 000 pixelů se snímkovací frekvencí v plném rozlišení 500 Hz. Při snížení rozlišení čipu lze docílit snímkovací frekvence až 4000 Hz.



Obr. 2.3.3.1. Celá měřicí soustava Aramis (PC, Trriger, propojovací kabely, stativ, dvě kamery).



Obr. 2.3.3.2. Detailní obrázek kamer Aramisu s LED osvětlením.

2.3.4. PONTOS [7], [12]

Pontos je mobilní optický bezkontaktní měřicí systém (viz. obr. 2.3.4.1.). Pro 3D zobrazení je tento systém vybaven dvěma kamerami, které jsou synchronizovány. Princip měření spočívá v optické triangulaci (viditelný modulovaný bod je promítán na cílovou plochu). Počet měřených bodů je neomezený a také je nezávislý na snímkovací frekvenci. Měřený objekt je potřeba označit optickými body. Při měření jsou tyto optické body snímány, následně se dopočítají jejich prostorové souřadnice, posunutí a deformace jednotlivých bodů. Tento měřicí systém se používá hlavně v leteckém a automobilovém průmyslu. Měřicí systém Pontos má mnoho využití, mezi které patří měření vibrací, deformací, ověření koncepčních designových návrhů a počítačových simulací, měření kinematických a kinetických veličin těles a soustav. Více o tomto měřicímu systému je např. v [13].



Obr. 2.3.4.1. Kamery měřicího systému Pontos.

2.3.5. ARGUS [7], [8], [11], [14]

Argus se řadí mezi optické bezkontaktní měřicí systémy, které jsou určeny především k měření deformací při lisování plechů (viz. obr. 2.3.5.1.). Využívá se hlavně při měření, kde není možno sledovat průběh lisování po celou dobu. Toto je hlavní rozdíl od již popsaných měřicích systémů Aramis a Pontos, kde je potřeba zaznamenávat zkoušku kontinuálně od začátku do konce. Prostorový obraz u systému Argus se získává tak, že se proces snímá pouze jednou kamerou z více poloh a poté se snímky skládají. K analýze nám stačí pouze počáteční a koncový stav, na těchto snímcích musí být zachyceny na okraji vzorku kalibrační kameny (jsou opatřeny kalibračními body viz. obr. 2.3.5.2.). Ty nám slouží ke kalibraci systému, ten je pak schopný rozpoznat stav jednotlivých výlisků před a po lisování. Na zkušebních vzorcích musí být nanесena deformační síť, která se bude deformovat zároveň s tvářeným materiálem. Výsledky z měření nám především poslouží ke zjištění vlastností materiálu a k detekci oblastí s kritickou deformací.



Obr. 2.3.5.1. Měřicí systém Argus.



Obr. 2.3.5.2. Ukázka měřeného vzorku spolu s kalibračními kameny.

2.4. Diagram mezních přetvoření [5], [15], [16], [17], [18]

Při tváření se rovinný plech přeměňuje do prostorového tělesa, tento tvářený plech je podroben vnějšímu, avšak převážně dvouosému namáhání. Abychom mohli hodnotit soudržnost tvářeného materiálu, tak musíme znát dvě důležité kombinace namáhání (tah – tah, tah – tlak), v případě jednoosého namáhání pouze tah.

Deformace je vnějším projevem účinku vnitřních napětí vnesených do tvářeného materiálu nejčastěji vnější mechanickou silou. Mezní deformaci lze definovat jako maximální deformaci tvářeného plechu při přeměně v prostorové těleso, která ještě nezpůsobí podstatné snížení tloušťky stěny výtažku proti původní tloušťce plechu.

Jestliže je potřeba hodnotit tvářitelnost tenkých ocelových plechů, tak je pro posouzení lisovatelnosti materiálu nutné respektovat různé stavy napjatosti, které se mohou v procesu tváření vyskytnout. Výsledek bude zobrazen ve formě diagramu, který bude popisovat celý interval stavů napjatosti. Tento diagram nám ve výsledku zobrazí mezní stav bezpečného lisování daného materiálu. Tento diagram se nazývá diagram mezních přetvoření (DMP) v anglicky psané literatuře FLD (forming limit diagram) a hranice lisovatelnosti se nazývá křivka mezních přetvoření (KMP) v anglicky psané literatuře FLC (forming limit curve).

DMP lze teoreticky vysvětlit pomocí podmínek ztrát stability během tváření, kdy je přírůstek sil působících na materiál rovný nule nebo může nabýt i záporné hodnoty. Dají se rozlišit tři stavy nestability podle mechanického přetvoření.



- **Ztráta stability na mezi kluzu** – vyskytuje se v oblasti malých plastických deformací. Projevuje se tvorbou povrchových vrásek. Při dosažení oblasti rozvinutých plastických deformací vymizí.
- **Ztráta stability vybočením vlivem tlakových napětí** – objevuje se při tažení výlisku v oblasti přidržovače a to jako zvlnění, může se také vyskytnout na volném povrchu. Možnost jak odstranit tuto stabilitu v oblasti příruby je vhodné zvolení velikosti přidržovacího tlaku. Pro případ vzniku vln na volném povrchu výlisku se tento problém odstraní vytvořením místního prolisu.
- **Ztráta stability na mezi pevnosti** – objevuje se v oblastech, kde se vyskytuje velké plastické přetvoření. Z hlediska tváření má tato ztráta stability největší význam a to proto, že nebezpečí vzniku trhlin na výlisku nastává po jejím dosažení. Při jednoosém tahovém stavu napjatosti při dosažení meze pevnosti lze pozorovat změnu přetvoření, při tom se z původního rovnoměrného přetvoření vytvoří lokalizované (nerovnoměrné), které se projeví tvorbou krčku. Při dvouosé napjatosti se projevuje po překročení meze pevnosti lokální zúžení ve směru tloušťky. Zde má velký vliv také anizotropie materiálu.

Lze tedy obecně říci, že při lisování souvisí ztráta stability procesu s náhlým vyčerpáním plastických schopností materiálu a vznikem lomu. Jeden z faktorů, který ovlivňuje schopnost k plastické deformaci materiálu, je právě stav napjatosti. Jestliže označíme hlavní normálová napětí v rovině plechu σ_1 a σ_2 ($\sigma_3 = 0$ a $|\sigma_1| \geq |\sigma_2|$), lze pak napsat:

$$\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 1 : m_\sigma : 0, \quad (1)$$

kde: m_σ - ukazatel stavu napjatosti [-].

Ukazatel stavu napjatosti m_σ nabývá hodnot $m_\sigma \in <-1, 1>$ a jeho velikost je:

$$m_\sigma = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} . \quad (2)$$

Přetvoření definována jako logaritmická přetvoření φ_1, φ_2 ($\varphi_3 = 0$) odpovídají normálovým napětím. Mezní stavy přetvoření je výhodné vyjádřit v závislosti na napjatosti, avšak při daných rychlostně teplotních podmínkách. Všechna tři hlavní

přetvoření lze vyjádřit pomocí intenzity přetvoření, která v případě dosažení mezního stavu odpovídá **kritické intenzitě přetvoření** φ_{ik} :

$$\varphi_{ik} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varphi_{1k} - \varphi_{2k})^2 + (\varphi_{2k} - \varphi_{3k})^2 + (\varphi_{3k} - \varphi_{1k})^2}, \quad (3)$$

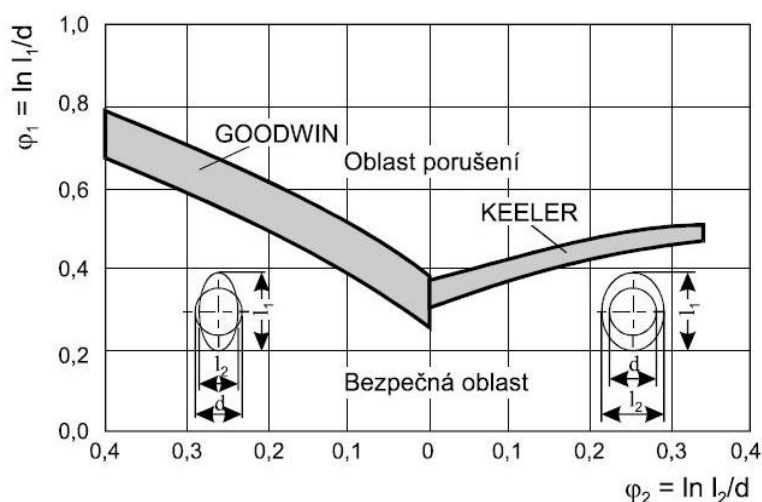
kde: φ_{ik} - kritické mezní přetvoření [-].

K sestrojení diagramu mezních přetvoření lze použít souřadnice m_σ - φ_{ik} , tohoto postupu použil ve svých studiích Tomlenov. Křivka mezního přetvoření vyjadřuje ztrátu stability na mezi pevnosti. V polovině 60. let navrhl Keeler a Goodwin postup k sestrojení DMP a to tak, že použili přímo naměřené hodnoty kritických hlavních normálových přetvoření φ_{1k} a φ_{2k} při daných stupních napjatosti. Jedná se tedy o závislost hlavního přetvoření φ_1 (major strain) a vedlejšího přetvoření φ_2 (minor strain). Jednotlivé stavy napjatosti pak charakterizuje m_σ .

Další ukazatel pro úměrné přetvoření je **ukazatel stavu přetvoření** m_φ [-] a je definován jako:

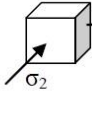
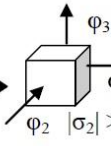
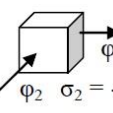
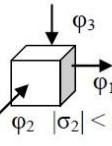

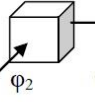
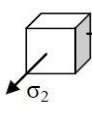
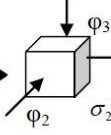
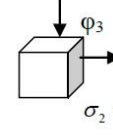
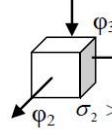
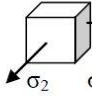
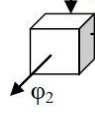
$$m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}. \quad (4)$$

A proto je tedy nejvýhodnější pro sestrojení DMP použít souřadnice φ_1 a φ_2 a k určení konkrétního stavu napjatosti použít m_φ , který nabývá hodnot $m_\varphi \in <-1, 1>$. Ke vzniku trhlin na výliscích dochází v intervalu $m_\varphi \in <-0,5, 1>$ toto tvrzení je založeno na zkušenostech. Při sestrovování diagramů mezních přetvoření v tomto rozsahu je pak nutno modelovat stavy přetvoření.



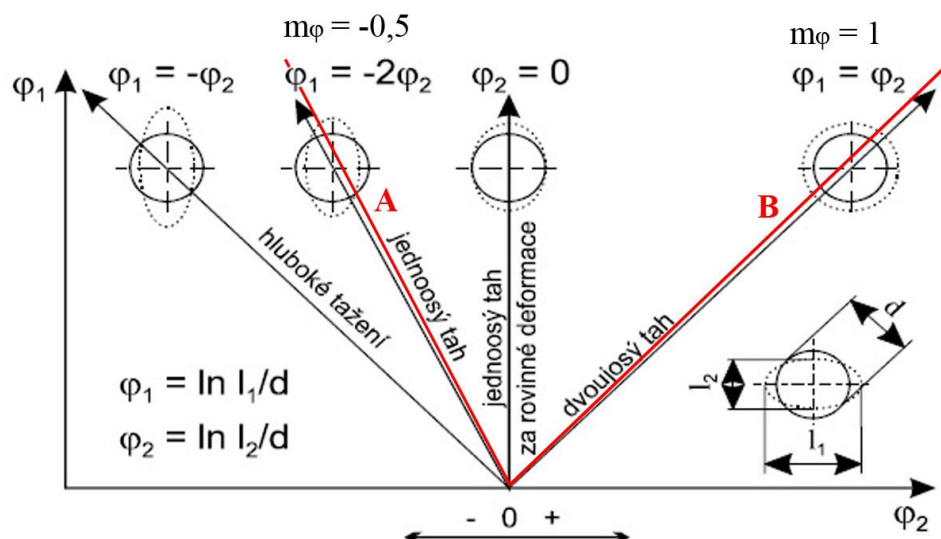
Obr. 2.4.1. Schéma diagramu mezního přetvoření dle Keelera – Goodwina [11].

V DMP je možné charakterizovat stavy napjatosti a přetvoření (viz. obr. 2.4.2.). Tyto stavy lze dále charakterizovat tzv. deformačními stopami podle obr. 2.4.3. V tomto obrázku je také znázorněn kruhový element deformační sítě před a po přetvoření při dané napjatosti.

	napjatost	přetvoření
1		  
2		 $\varphi_2 = \varphi_3 = -\frac{\varphi_1}{2}$
3		  
4		 $\varphi_1 = \varphi_2 = -\frac{\varphi_3}{2}$

Obr. 2.4.2. Schéma stavů napjatosti a přetvoření, které je uplatňováno při tažení výlisků.

Velikost mezních přetvoření je dána hlavně plastičností daného plechu, ale je také značně závislá na způsobu, jakým definujeme mezní stav. Za mezní stav lze pokládat mez pevnosti materiálu nebo dosažení porušení soudržnosti plechu tvárným lomem. K určení diagramu mezních přetvoření je zapotřebí získat hodnoty mezních přetvoření, a to v rozsahu vhodných stavů m_φ pro zvolený mezní stav v daném intervalu. Získání různých stavů m_φ lze početně či experimentálně.



Obr. 2.4.3. Deformační stopy při plošném tváření [11].

2.4.1. Určování DMP početními metodami [15], [19]

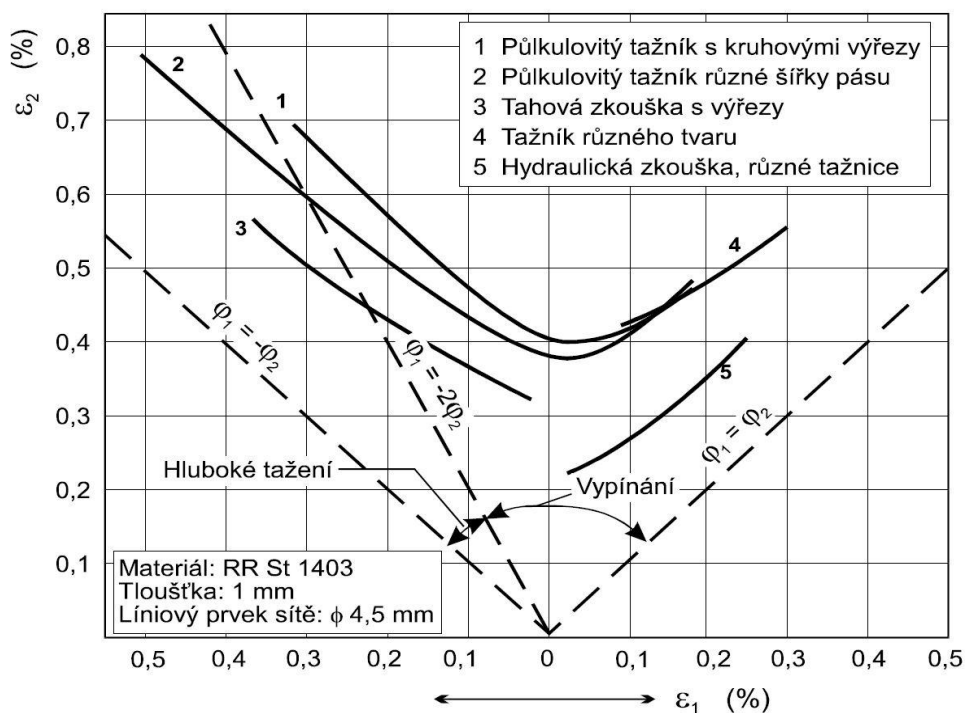
Početní metody jsou založeny na základě teoretického rozboru vlastností materiálu a to hlavně pomocí teorie plasticity. Jde především o vyjádření funkce materiálových charakteristik naměřených pomocí zkoušky tahem a pomocí stavu napjatosti. Takto získané vztahy pro všechny početní metody používají hodně zjednodušujících předpokladů, které mohou být v mnoha případech vzdálené od reality. Není možné brát teoreticky v úvahu všechny aspekty ovlivňující proces vzniku lokálních ztenčení, mezi které patří např. tření, tloušťka plechu a historie tváření. Tato skutečnost omezuje využití KMP pro zjištění DMP. V současnosti se k sestavení DMP používají převážně experimentální metody.

2.4.2. Určování DMP experimentálním způsobem [15], [16]

Principem této metody je definice mezního stavu, při jehož dosažení budou vyhodnocovány odpovídající mezní přetvoření $[\varphi_{2k}; \varphi_{1k}]$ při různých stavech napjatosti. Volba mezního stavu je důležitý aspekt, který rozhoduje o správnosti vyhodnocení DMP.

Ke zjištění DMP experimentální metodou je zapotřebí, podle definování mezního stavu, naměřit dostatečné množství hodnot mezních přetvoření, to znamená dvojice $[\varphi_{2k}; \varphi_{1k}]$ v rozsahu stavů přetvoření $m_\varphi \in <-0,5, 1>$. V současné době se pro zjišťování DMP nejčastěji používají laboratorní zkoušky, které jsou dále popsány. Jejich přehled je uveden na obrázku 2.4.2.1.

1. Zkouška vypínání tvarových přístřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem – patrně nejvýhodnější metoda simulující celý interval stavů přetvoření, pro přípravu vzorků stačí jeden střižný nástroj, nevýhodou je naopak patrná nespojitost mezních přetvoření v oblasti rovinného přetvoření ($\varphi_2 = 0$) => toto platí i pro Nakazima test.
2. Zkouška vypínání zkušebních těles v podobě pruhů proměnné šíře (tzv. Nakazima test) – kombinace ostatních metod pro simulování celého intervalu stavů přetvoření, ke zkoušení je zapotřebí vzorků mající rozdílnou šířku.
3. Zkouška tahem tyčí opatřených různými vruby – modelování různých stavů přetvoření díky různým tvarům vrubů, jednoduchá příprava, využití pouze pro levou větev KMP.
4. Zkouška hloubením plechu tažníky různých poloměrů – je potřeba tažníků různých poloměrů a využitelnost pouze pro pravou větev KMP.
5. Zkouška hydrostatická s kruhovou či eliptickou tažnicí – různé stavy přetvoření pomocí eliptických tažnic s proměnnou velikostí hlavních os, vyžaduje speciální zkušební zařízení, využití pouze pro pravou větev KMP.

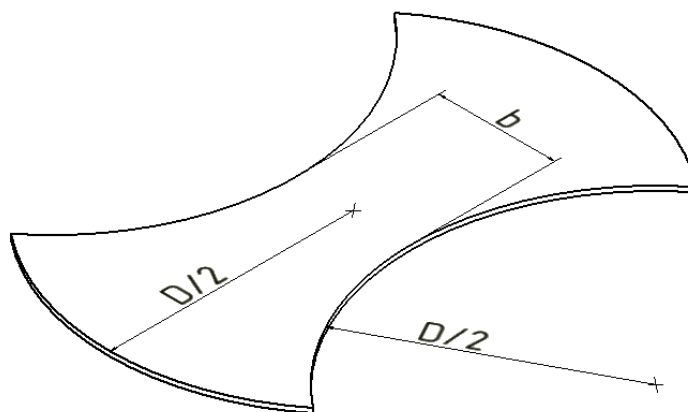


Obr. 2.4.2.1. Experimentální DMP zjišťovaný různými metodami [11].

Jednotlivé zkoušky se navzájem liší složitostí, nároky na zkušební zařízení, tvarem zkušebních vzorků a úplností výsledků, které poskytují.

Ze všech výše uvedených metod se patrně nejvíce používá první z nich. Mezi její největší výhodu patří to, že dokáže plynule pokrýt celý interval stavů přetvoření m_φ a dále nenáročnost na nástroje pro stříhání vzorků. Na obrázku 2.4.2.2. je znázorněn zkušební vzorek. K dosažení všech potřebných stavů přetvoření m_φ stačí postupně měnit šířku b , toho se dosáhne změnou velikosti kroku na střížném nástroji. Šířka zkušebního vzorku b se používá v rozsahu od $b = 30$ mm do $b = 210$ mm. Šířka $b = 30$ mm odpovídá stavu přetvoření pro zkoušku tahem, kde $m_\varphi = -0,5$ (deformační stopa A na obrázku 2.4.3. Maximální šířka $b = D$, kde zkušební vzorek je v podobě plného kruhu odpovídá rovnoosému vypínání, kde $m_\varphi = 1$ (deformační stopa B na obrázku 2.4.3.).

Z experimentálních měření bylo zjištěno, že k plynulému pokrytí intervalu $m_\varphi \in <-0,5, 1>$ je nutno použít minimálně 13 vzorků o různých šířkách. V praxi se ale běžně používá pro zjišťování DMP jen asi 5÷7 deformačních stop.



Obr. 2.4.2.2. Schéma zkušebního vzorku.

Naměřené výsledky z experimentálně získaných limitních diagramů, které se získávají různými technikami, se mohou lišit. Toto je způsobeno především díky nestejnorodým podmínkám při měření. Jedná se hlavně o různou aktuální teplotu, rychlost deformace a specifické faktory jednotlivých zkoušek. Mezi tyto faktory se dále řadí tření, napětové stavy a nehomogenita, textura materiálu, deformace při různé geometrii vzorků a nástrojů. V následující kapitole budou některé faktory popsány podrobněji.



2.4.3. Faktory ovlivňující DMP [11], [5]

Existuje mnoho faktorů, které mohou ovlivnit diagram mezních přetvoření. Do nich lze zahrnout materiálové charakteristiky, které ovlivňují polohu křivky mezních přetvoření (KMP). Jedny z nejdůležitějších materiálových charakteristik využívaných při výpočtu mezních přetvoření patří zejména:

- exponent deformačního zpevnění n ,
- poměr plastických přetvoření neboli normálová anizotropie r ,
- lomová přetvoření $\varphi_{1L,2L}$,
- koeficient monotónního zpevnění C ,
- parametr zeslabení t popisující rozdíly v tloušťce plechu,
- exponent m popisující citlivost materiálu na rychlost deformace.

KMP je tedy více či méně závislá na výše uvedených parametrech. Dále si některé z nich popíšeme, avšak podrobněji je tato problematika popsána např. v [11] a [20]. Lze napsat, že s rostoucí hodnotou n se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 . Stejně tak je tomu v případě normálové anizotropie, s rostoucí hodnotou r se KMP posouvá k vyšším hodnotám φ_1 . Se zvyšujícím se parametrem zeslabení t , se KMP posouvá také k vyšším hodnotám φ_1 .

Další faktory ovlivňující DMP můžou nastat při samotném měření experimentu, a to v podobě volby frekvence snímání celého procesu. Jednou z dalších chyb může být nepřesné odečítání porušení (okamžik vzniku zeslabení – vznik krčku). Toto vyhodnocování může být také ovlivněno lidským faktorem.

2.5. Technologické zkoušky kovů [11]

Technologické zkoušky určují vhodnost materiálu k určitým technologickým operacím nebo upřesňují technologické podmínky při zpracování. Tyto zkoušky vlastně napodobují proces výroby a určují parametry a podmínky. Většinou napodobují chování materiálu při jednoduchých tvářecích procesech. Mezi technologické zkoušky patří:



- zkouška kombinovaná,
- zkouška kališková,
- zkouška rozšiřování otvoru,
- zkouška hloubením,
- zkouška hydraulická,
- zkouška klínová.

Tyto uvedené zkoušky zde nebudou více popisovány, více o nich bylo napsáno např. v [11], [18], s výjimkou zkoušky kombinované. V experimentální části této práce byl proveden experiment na stroji určeném mimo jiné pro tuto zkoušku.

2.5.1. Zkouška kombinovaná [11], [21]

Zkouška pro zkoušení plechů probíhá na univerzálním stroji sloužící pro zjišťování hlubokotažnosti, který se může podle německé literatury označovat zkratkou TZP (tiefziehprüfung), dále bude psáno už jen TZP (viz. obr. 2.5.1.3.). Tato kombinovaná zkušební metoda dle Gross-Engelhardta je založena nejprve na hlubokém tažení a poté na vypínání zkoušeného plechu. Zkouška je ukončena po detekci trhliny. Posloupnost dějů při této zkoušce zde bude vysvětlena pomocí obrázků obr. 2.5.1.1. a obr. 2.5.1.2. Na nich jsou zobrazeny řezy v různých okamžicích při tváření. Samotný nástroj lze rozdělit na horní a spodní část. Horní část nástroje je statická a má dvě funkce, nejprve slouží jako střižník a poté jako tažnice. Oproti tomu spodní část nástroje je pohyblivá. Slouží jako střižnice, přidržovač a tažník. Pohyb nástrojů zajišťují tři hydraulické válce.

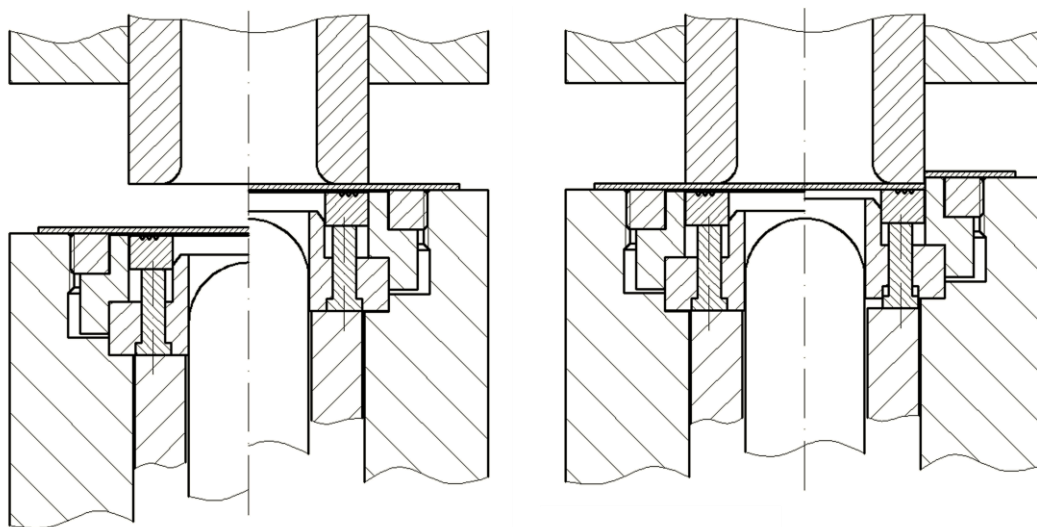
Při vyhodnocování se zjišťuje tzv. přirozený stupeň hlubokotažnosti T , který je ukazatelem tvařitelnosti plechu. Ukazatel je definován vztahem:

$$T = \frac{(F_p - F_T)}{F_p} [-], \quad (5)$$

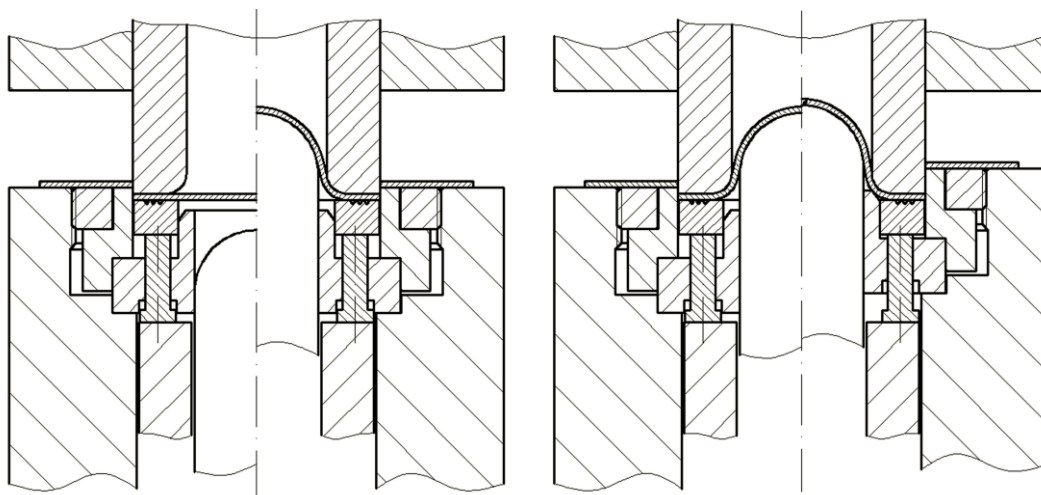
kde: F_p – max. tažná síla, při které je vzorek sevřen druhým (zasekávacím) přidržovačem a při které dojde k utržení dna výtažku [N],
 F_T – tažná síla [N].

Pochody při tváření

Před samotným tvářením je potřeba založit pás plechu do nástroje. Po zapnutí stroje se dá do pohybu celá spodní část nástroje (směrem vzhůru). Na obrázku 2.5.1.1. vlevo je zobrazeno přitlačení zkušebního plechu na horní část nástroje. Na tom samém obrázku vpravo je již zobrazen ustřižený plech. Po operaci stříhání začíná samotné tažení. Tažník ovládaný samostatným hydraulickým válcem zahájí proces tažení (viz. obr. 2.5.1.2. vlevo). Síla přidržovače je zajištěna přepouštěcím ventilem, který je napájen tlakem z hydraulického válce ovládající celou spodní část nástroje. Jako poslední krok je zajištění zasekávajícího přidržovače do taženého plechu (viz. obr. 2.5.1.2 vpravo). V tomto okamžiku se plech přestane vtahovat do tažnice. Tímto začíná proces vypínání plechu, dále následuje porušení plechu (viz. obr. 2.5.1.2 vpravo). Jako poslední se zastaví tažník, poté se všechny části vrátí do původní polohy.



Obr. 2.5.1.1. Schéma průběhu kombinované zkoušky.



Obr. 2.5.1.2. Schéma průběhu kombinované zkoušky.

Univerzální zkušební stroj pro stanovení hlubokotažnosti je zobrazen na obrázku 2.5.1.3. Pro lepší představu byl nástroj se všemi částmi vymodelován a zobrazen na obrázku 3.4.2.3. Nástroj je poháněn hydraulickými válci, tažná síla dosahuje 200 kN. Přidržovač dokáže vyvinout sílu 200 kN. Zkušební hlava je opatřena bajonetovým zámkem. To umožňuje přímý přístup k tažníku, tažnici, střížníku a přidržovači. Lze tak rychle a pohodlně vyměnit střížné či tažné nástroje. Tento stroj není určen pouze pro běžné zkoušky hlubokotažnosti, ale také pro velký počet dalších technologických zkoušek. Více informací o tomto stroji je např. v [21].



Obr. 2.5.1.3. Univerzální zkušební stroj 142-20 Basic [21].



3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Prvotním cílem této diplomové práce bylo stanovení diagramů mezních přetvoření pro hlubokotažný ocelový plech DC05 ZE 75/75 B P pomocí dvou metod. Měření experimentu bylo provedeno pomocí dvou zkušebních strojů. Realizace vypínání zkušebních vzorků proběhla v první řadě na dvojčinném hydraulickém lisu CBA 300/63, který byl umístěn v prostorách dílny Katedry strojírenské technologie. Tato metoda byla naměřena v souladu s normou ISO/DIS 12004-2. Pro naměření druhé metody bylo použito zkušební zařízení pro stanovení hlubokotažnosti. Podle německy psané literatury může být toto zařízení označováno zkratkou TZP (tiefziehprüfung). Zařízení bylo již představeno v kapitole 2.5.1. a nacházelo se v laboratořích Katedry strojírenské technologie.

Pro zjištění diagramů mezních přetvoření byla použita metoda vypínání tvarových přístřihů s vystřiženými kruhovými segmenty konstantního poloměru polokulovým tažníkem. V kapitole 2.4. již byly popsány teoretické poznatky spolu s možnostmi experimentálního zkoušení.

Pro nasnímání celého experimentu byl použit optický bezkontaktní měřicí systém Aramis s rozlišením CCD čipu 2M, jeho maximální snímací frekvence byla 6 Hz, která byla v obou případech použita. Pro vyhodnocení naměřených dat byl využit program Aramis v6.3.0.

Hlavním cílem experimentální práce bylo vzájemné porovnání naměřených DMP respektive KMP získaných pomocí obou metod.

3.1. Použitý materiál

Pro experimentální část této práce byl použit hlubokotažný materiál DC05 ZE 75/75 B P. Jedná se o elektrolyticky pozinkovaný ocelový plech válcovaný za studena o tloušťce 0,8 mm.

Vysvětlení označení:

- D – ploché ocelové výrobky k tváření,
- C – způsob válcování (za studena),
- 05 – jakost oceli,
- ZE – povrchová úprava (elektrolyticky pozinkováno),
- 75/75 – tloušťka pozinkované vrstvy (oboustranný pozink 7,5 μm),
- B – jakost povrchu (B = lepší),
- P – dodatečná povrchová úprava (fosfátováno).



Popisovaný materiál se podle dodavatelů plechů (viz. [22] a [23]) vyznačuje mechanickými parametry uvedenými v následující tabulce 3.1.1.

Tab. 3.1.1. Mechanické hodnoty materiálu DC05 ZE 75/75 B P dle dodavatelů.

Materiál (EN 10152)	R_e min. – max. [MPa]	R_m min. [MPa]	$A_{80\text{mm}}$ min. [%]	r_{90}	n_{90} min.
DC05	140 - 190	270 - 330	39	1,90	0,19

3.1.1. Statická zkouška tahem

K ověření základních materiálových charakteristik zkoušeného materiálu byla využita statická zkouška tahem podle normy ČSN EN ISO 6892-1. Zkušební vzorky byly odebrány ve třech směrech (0° , 45° , 90°) vůči směru válcování. Výsledný tahový diagram je zobrazen na obr. 3.1.1.1. Od každého směru byly vždy odzkoušeny čtyři vzorky. Zkouška byla provedena na stroji TIRAtest 2300.

Naměřené hodnoty byly zpracovány a souhrnně uvedeny v tabulce 3.1.1.1. Kde jsou uvedeny střední aritmetické průměry měřených veličin spolu s výběrovými směrodatnými odchylkami s . Dále je v ní uvedena směrová střední hodnota, která je dána vztahem:

$$x_s = \frac{(x_{0^\circ} + 2 \cdot x_{45^\circ} + x_{90^\circ})}{4}, \quad (6)$$

kde: x_s – směrově střední hodnota

x_{0° , x_{45° , x_{90° – hodnoty ve směrech 0° , 45° a 90° podle směru válcování plechu.

Výpočet středních hodnot a směrodatných odchylek byl proveden dle následujících rovnic:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (7)$$



$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (8)$$

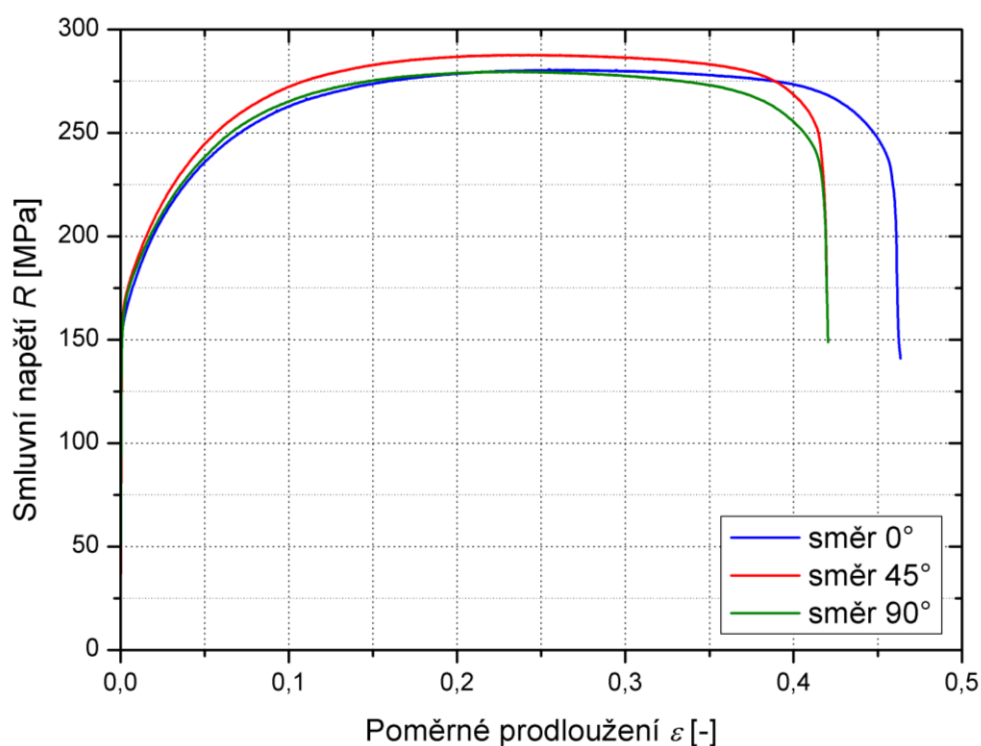
kde: \bar{x} – střední hodnota výběru,

x_i – dílčí hodnota i-tého prvku výběru,

n – počet prvků výběru.

Tab. 3.1.1.1. Naměřené mechanické hodnoty materiálu DC05 ZE 75/75 B P.

Směr odebrání	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80mm} [%]	r [-]	n [-]	C [MPa]
0°	163,50	280,82	46,34	1,62	0,22	490,00
s	0,92	0,41	1,19	0,02	0,01	1,25
45°	170,10	287,81	41,98	1,36	0,21	495,21
s	0,47	1,03	0,73	0,01	0,01	0,92
90°	167,20	279,75	42,04	1,98	0,21	478,60
s	0,58	0,67	0,92	0,06	0,01	1,50
x_s	167,73	284,05	43,09	1,58	0,21	489,76



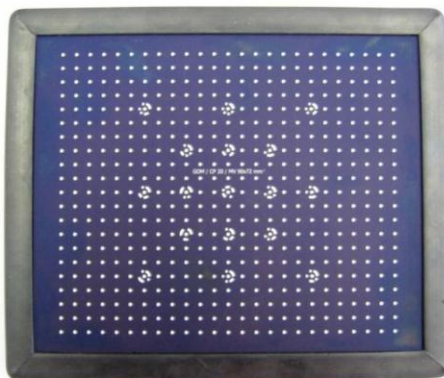
Obr. 3.1.1.1. Porovnání smluvních tahových diagramů materiálu DC05 ZE 75/75 B P, v závislosti na směru odebrání zkušebních vzorků vůči směru válcování.

3.1.2. Aplikace a vlastnosti použitého materiálu [24]

Tento materiál patří do skupiny IF ocelí. Jedná se o velice mnohostranný materiál, využívaný především pro svoji výbornou korozní odolnost na výrobu karosérií v automobilovém průmyslu, dílů strojů, krytin střech a domácích spotřebičů. Má velmi dobrou tváritelnost, nízkou nevýraznou mez kluzu, ale také poměrně nízkou mez pevnosti. Vyznačuje se vysokou chemickou čistotou povlakové vrstvy a rovnoměrnou tloušťkou povlaku. Plech je vyráběn podle normy EN 10152.

3.2. Příprava a kalibrace optického měřicího systému Aramis

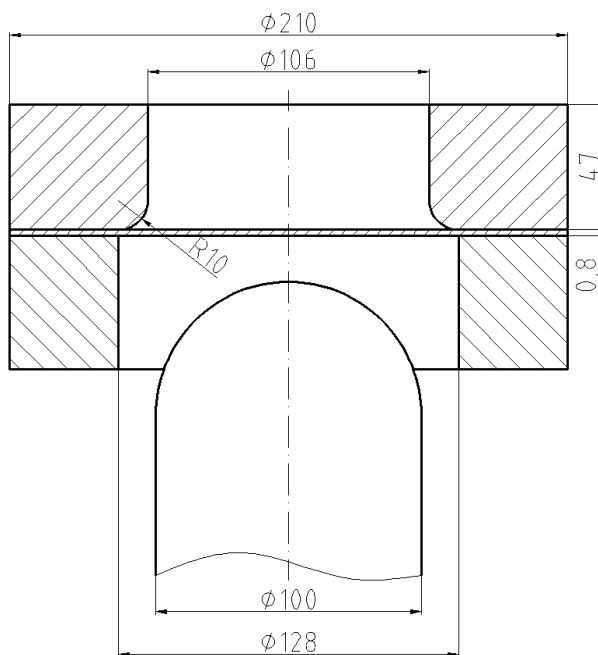
V první řadě se optický bezkontaktní měřicí systém Aramis nainstaloval na požadované místo ke stroji. Důležité bylo, aby obě kamery směřovaly do nástroje, kde bude probíhat měření deformace. Neméně důležité bylo vhodné nasvícení snímané oblasti. V dalším kroku bylo nutné celý systém zkalibrovat a to z toho důvodu, aby si snímané body (pixely) odpovídaly svojí polohou a orientací ve 3D souřadnicovém systému. Ještě před samotnou kalibrací byly obě kamery zaostřeny na požadovanou vzdálenost a nastaveny clony v závislosti na osvětlení. Toto bylo provedeno pomocí vytištěného textu na papíře. Dále byla provedena samotná kalibrace pomocí kalibrační destičky (viz. obr. 3.2.1.). Byla použita kalibrační destička o rozměrech 90x72 mm². Podle kalibrační hloubky se objekt musí snímat v hloubce 450 mm před objektivy kamer. Jak už bylo napsáno, kalibrační destička nám pomohla zkalibrovat celý systém, to se provedlo jejím postupným přibližováním, oddalováním, otáčením a natáčením na levou či pravou kameru. To muselo proběhnout v přesné posloupnosti podle pokynů softwaru. Mezi kamerami byl červeně svítící laser, který nám pomohl při kalibraci udržet kalibrační destičku uprostřed kalibračního objemu. Tento proces nastavení a kalibrace Aramisu byl použit u obou dále popsáných měření.



Obr. 3.2.1. Kalibrační destička.

3.3. Diagramy mezních přetvoření dle normy

K získání DMP byl použit hydraulický dvojčinný lis spolu s optickým měřicím systémem Aramis. Použité zkušební vzorky byly o průměru 210 mm. K získání DMP byla použita metoda vypínání tvarových vzorků s proměnnou šířkou polokulovým tažníkem. Řez nástrojem je zobrazen na obrázku 3.3.1. Vše bylo provedeno v souladu s normou ISO/DIS 12004-2 [25]. Popis celého experimentu je popsán v následujících kapitolách.



Obr. 3.3.1. Řez tvářecím nástrojem.

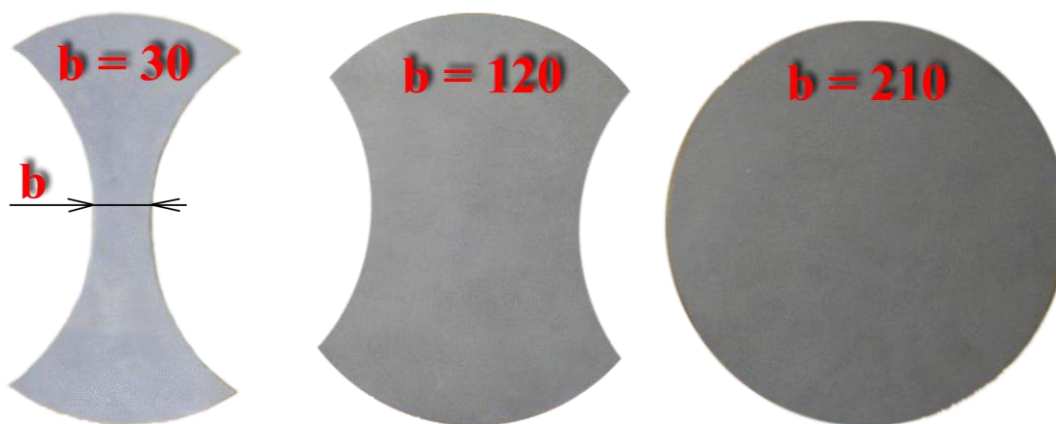
3.3.1. Příprava zkušebních vzorků a měření DMP

V první řadě bylo zapotřebí vystříhnout zkušební vzorky z plechu o průměru 210 mm. Byly zvoleny tři deformační stopy, které pokrývají stavy přetvoření $m_\varphi = -0,5$, $m_\varphi = 0$ a $m_\varphi = 1$. Podle tohoto byly zhotoveny tvarové přístřihy o šířkách 30, 120 a 210 mm (viz. obr. 3.3.1.1). Od každého přístřihu bylo zhotoveno pět zkušebních vzorků.

Počet deformačních stop by byl pro úplné zjištění DMP nedostačující (bylo by potřeba použít minimálně 13 deformačních stop), ale vzhledem k tomu, že se v této práci jedná pouze o porovnání dvou metod, tak nám tento počet postačí.

Vzorky se stříhaly tak, aby φ_1 bylo vždy kolmo na směr válcování plechu. Tvarové přístřihy byly vyhotoveny pomocí střížného nástroje na výstředníkovém lisu. Hotové vzorky jsou zobrazeny na obrázku 3.3.1.1.

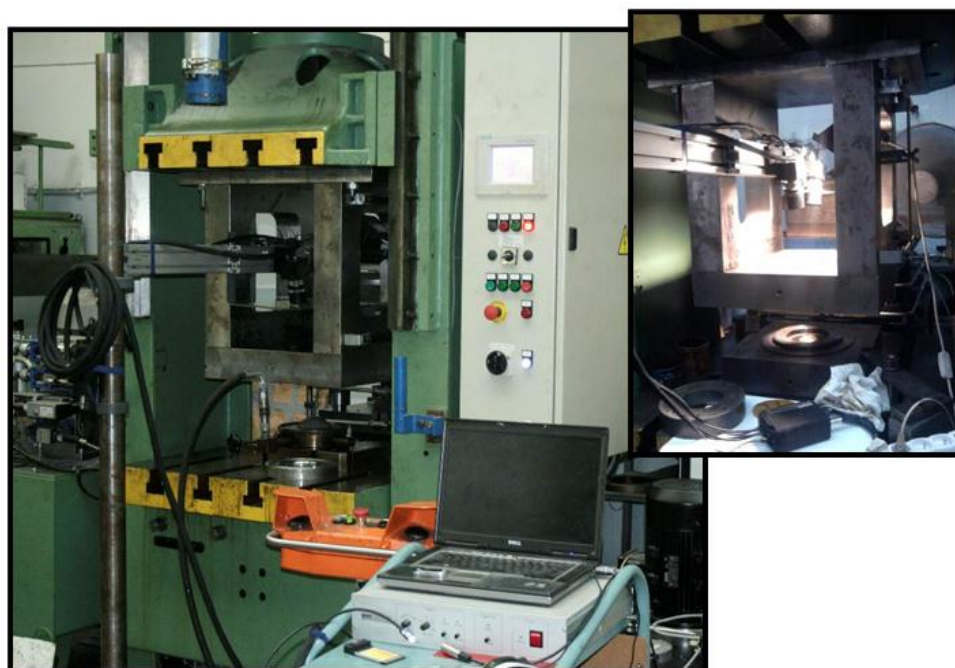
Takto nastříhané vzorky byly odmaštěny pomocí acetonu z důvodu odstranění nečistot a zajištění přilnavosti akrylátového spreje. Pak byly nastříkány sprejem bílé barvy. Poté následoval zcela náhodný nástřik tentokrát z větší vzdálenosti a to černou barvou. Po správném provedení tohoto postupu vznikl na povrchu zkušební vzorku tzv. pattern. Takto nastříkané vzorky by měly být odzkoušeny zhruba do 5 minut. A to z toho důvodu, aby barva zcela nevytvdla, ale zůstala částečně “plastická“, jinak by totiž hrozilo popraskání patternu při tváření (znehodnocení výsledků). Systém Aramis pomocí patternu přiřadí každému bodu na snímaném vzorku charakteristické číslo (odstín šedi) a poté si vytvoří vlastní deformační síť. Měření samotné deformace, pak probíhá snímáním posunu těchto bodů a deformace sítě.



Obr. 3.3.1.1. Přístřihy zkušebních vzorků s uvedenými šířkami b [mm].

Bezkontaktní optický snímací systém Aramis byl nainstalován na dvojčinný hydraulický lis tak, aby mohl být systém zkaliťován a poté mohla být celá zkouška nasnímaná. Kalibrace proběhla podle postupu uvedeného v kapitole 3.2. Na obrázku 3.3.1.2. je vidět umístění Aramisu. K měření byl pro zlepšení světelných podmínek použit halogenový reflektor. Součástí měřicího systému Aramis byl také trigger pro řízení frekvence snímání společně s PC pro vyhodnocování naměřených dat.

Před založením zkušebního vzorku do nástroje byl nejprve vzorek a poté i nástroj (tažník) potřen mazivem Mogul AA00. To bylo provedeno z důvodu snížení tření mezi nástrojem a zkušebním vzorkem. Mezi tažník a zkušební vzorek byla navíc vložena tvářecí fólie PA (tloušťka 2 mm), taktéž pro snížení tření. Toto opatření by mělo zajistit prasknutí zkušebního vzorku v oblasti vrchlíku a mělo by eliminovat praskání ve stěně vzorku. Po založení zkušebního vzorku do nástroje se umístila přídržovací deska. Po následném najetí na přídržovač mohlo být zahájeno vlastní tváření zkušebního vzorku. Do přístřihu, který byl pevně sevřen v oblasti příruby, najel polokulový tažník o průměru 100 mm. Optický měřicí systém Aramis byl spuštěn souběžně s počátkem pohybu tažníku. Měřicí frekvence kamer byla nastavena na 6 Hz, rychlost tažníku byla na stroji nastavena na 1 mm/s. V kapitole 3.3.5. bude popsána skutečná naměřená rychlost posunu tažníku. Měření bylo ukončeno po detekci první trhliny na vzorku podle normy [25].

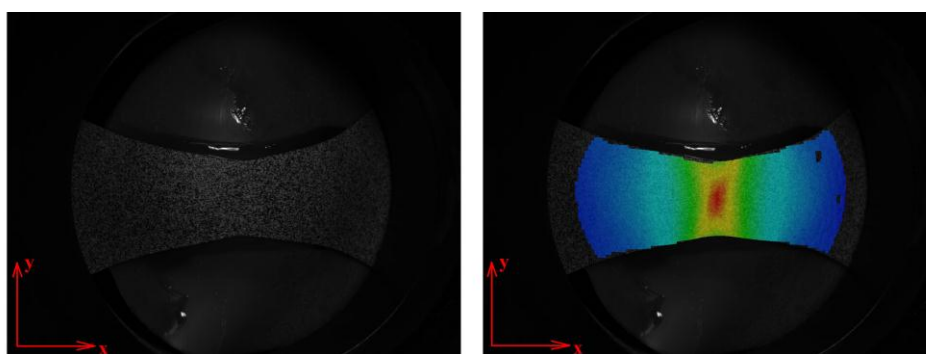


Obr. 3.3.1.2. Hydraulický dvojčinný lis CBA 300/63 spolu s optickým měřicím systémem Aramis.

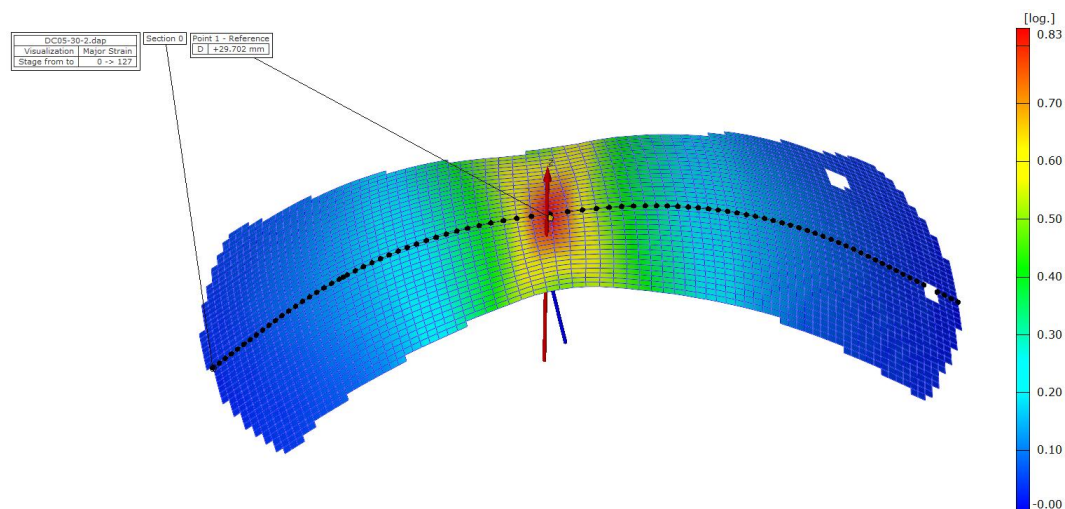
3.3.2. Vyhodnocení měření

Vyhodnocení provedeného experimentu bylo uskutečněno v programu Aramis. Postup vyhodnocování zde bude popsán podrobněji pouze pro jednu deformační stopu, kterou představuje tvarový přístřih o šířce 30 mm. Pro další stopy byl postup proveden analogicky. Všechny výsledky budou uvedeny v tab. 3.3.6.1. Kde budou uvedeny střední aritmetické průměry spolu s výběrovými směrodatnými odchylkami.

Pro každý pořízený snímek byla vypočítána deformace na povrchu tvářeného vzorku. Mezní stav byl vždy zvolen jako poslední snímek před vznikem trhliny a ten se poté vyhodnotil. Tento stav je zobrazen na obrázku 3.3.2.1. Z tohoto obrázku je patrné, že hlavní deformace (Major Strain) φ_1 prochází podélným řezem vzorku, tedy osou x . Vedlejší deformace (Minor Strain) φ_2 prochází příčným řezem vzorku, tedy osou y . Obě tyto deformace byly vytvořeny z dat získaných z řezu 0 (Section 0), který je rovnoběžný s osou x , který je zobrazen na obrázku 3.3.2.2.

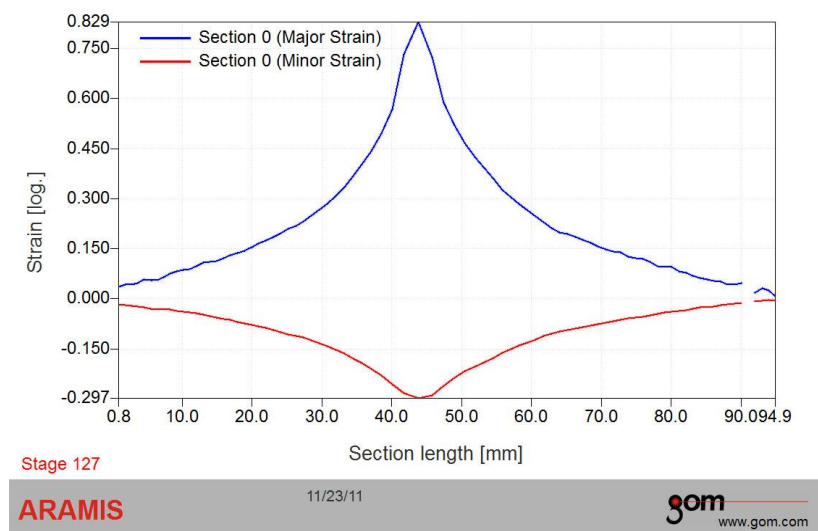


Obr. 3.3.2.1. Vlevo zobrazení zkušebního vzorku ($b = 30$ mm) optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny, na pravém obrázku je navíc zobrazeno barevné rozložení deformace, také těsně před vznikem trhliny.



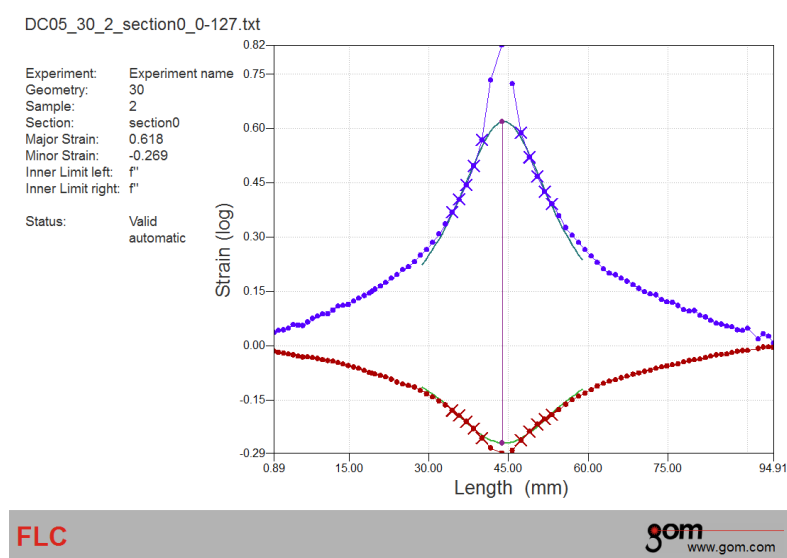
Obr. 3.3.2.2. Rozložení hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny.

Program Aramis vyexportoval z naměřených dat průběhy hlavních a vedlejších deformací (viz. obr. 3.3.2.3.). Ale tyto hodnoty nelze použít jako výsledné hodnoty k sestavení výsledného DMP a to proto, že při tváření za meze pevnosti nastává nestabilita (lokalizovaná deformace ve směru tloušťky). Toto zúžení materiálu zohledňuje norma ISO/DIS 12004-2 [25].



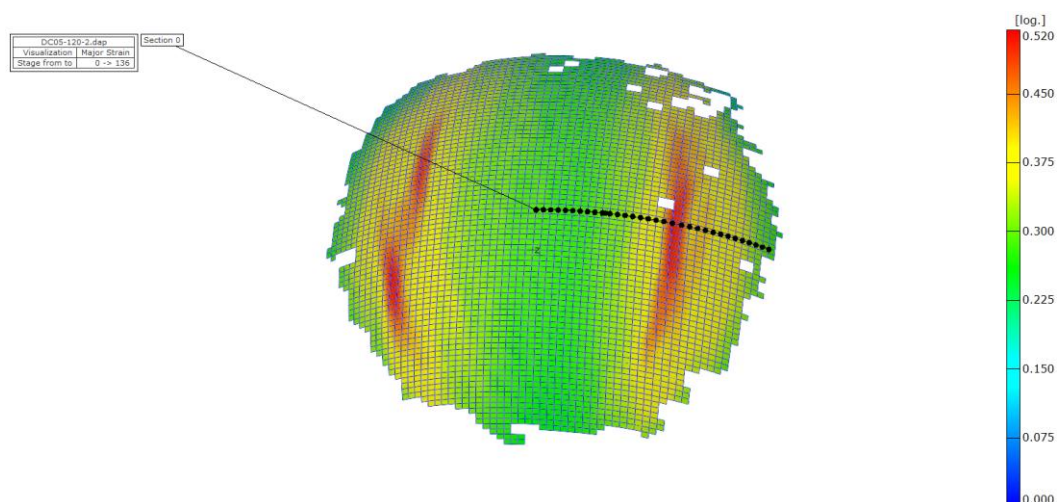
Obr. 3.3.2.3. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejšího deformace φ_2 (červeně) pro přístřih o šířce 30 mm.

V již zmíněné normě je uveden postup pro získání hodnot, ze kterých se následně sestaví DMP (průběh KMP). Program Aramis tento výpočet umí. Výstupní protokol z programu Aramis po provedeném výpočtu je zobrazen na obrázku 3.3.2.4.

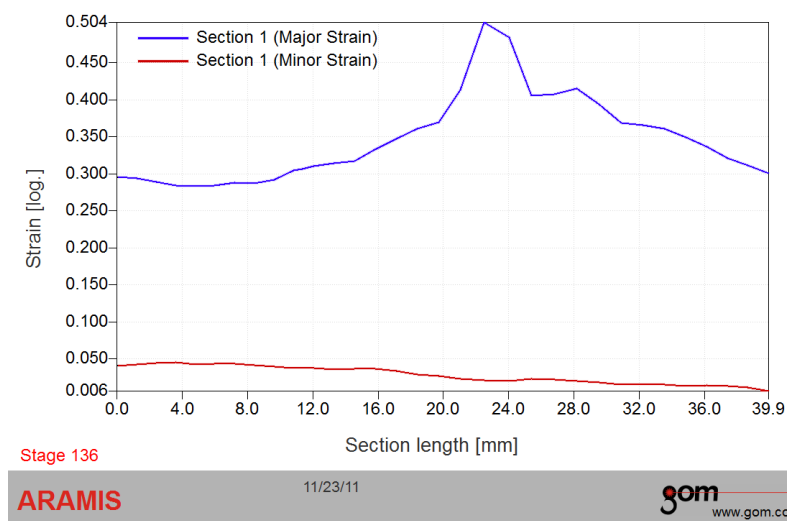


Obr. 3.3.2.4. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejší deformace φ_2 (červeně) pro přístřih o šířce 30 mm po provedeném výpočtu dle normy [25].

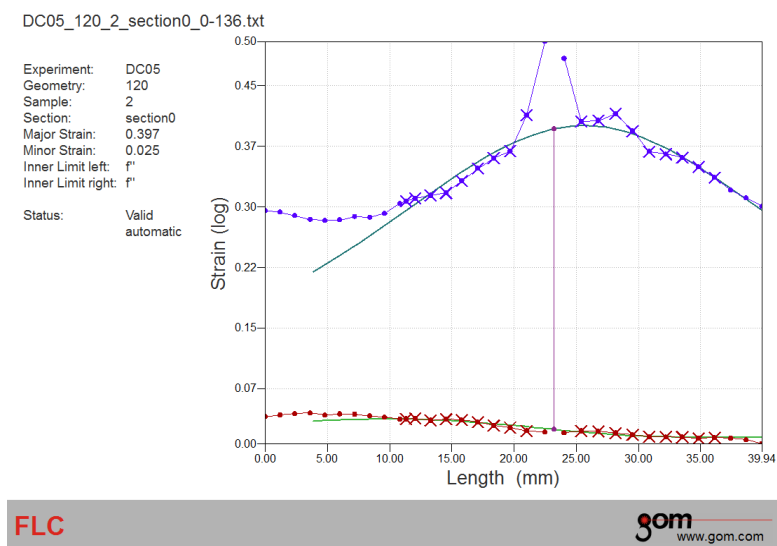
Další deformační stopu představuje zkušební vzorek o šířce přístřihu 120 mm, na obrázku 3.3.2.5. je zobrazena hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny. Dále jsou pak na obrázcích 3.3.2.6. a 3.3.2.7. zobrazeny výstupní protokoly z programu Aramis, na kterých je zachycen naměřený a vypočítaný průběh hlavní deformace φ_1 společně s vedlejší deformací φ_2 .



Obr. 3.3.2.5. Rozložení hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny.

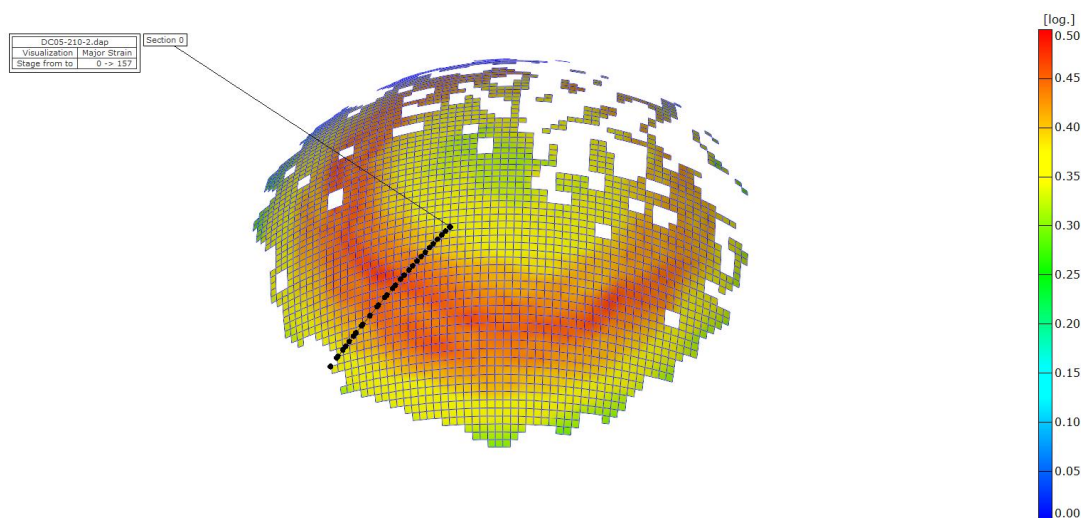


Obr. 3.3.2.6. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejší deformace φ_2 (červeně) pro přístřih o šířce 120 mm.

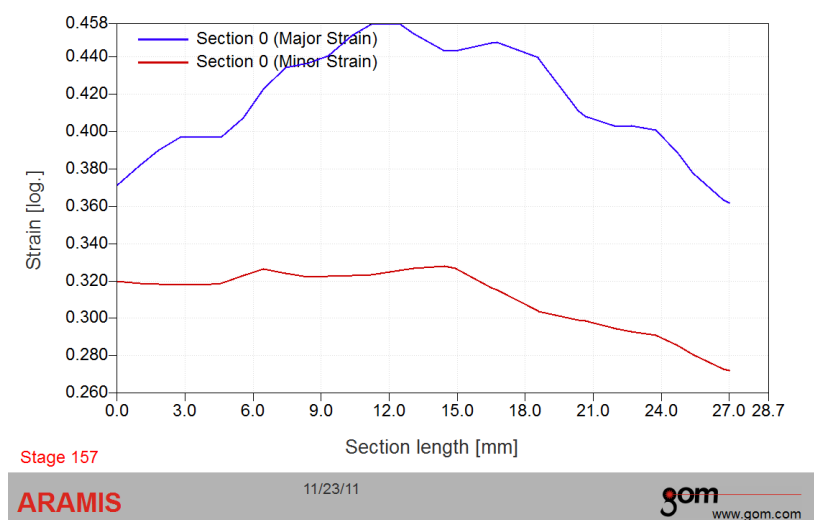


Obr. 3.3.2.7. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejší deformace φ_2 (červeně) pro přístřih o šířce 120 mm po provedeném výpočtu dle normy [25].

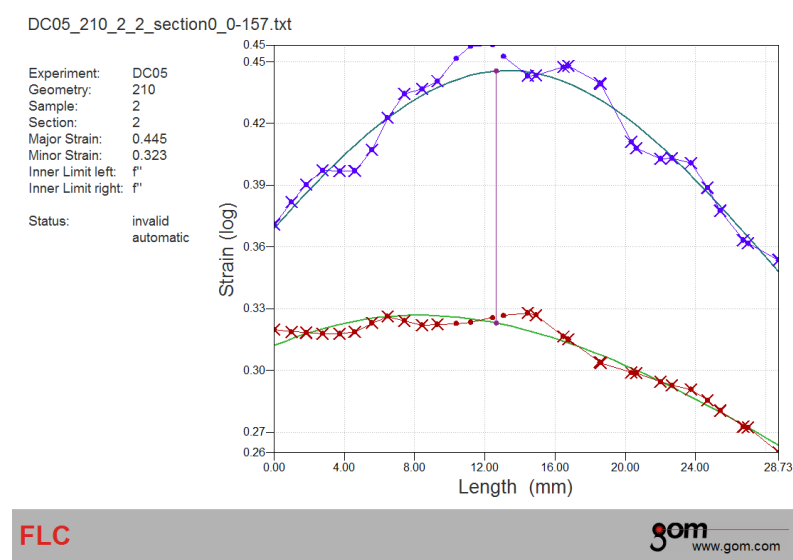
Poslední deformační stopou byl zkušební vzorek o šířce přístřihu 210 mm, na obrázku 3.3.2.8. je zobrazena hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny. Dále jsou pak na obrázcích 3.3.2.9. a 3.3.2.10. zobrazeny výstupní protokoly z programu Aramis, na kterých je zachycen naměřený a vypočítaný průběh hlavní deformace φ_1 společně s vedlejší deformací φ_2 .



Obr. 3.3.2.8. Rozložení hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny.



Obr. 3.3.2.9. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejší deformace φ_2 (červeně) pro přístřih o šířce 210 mm.

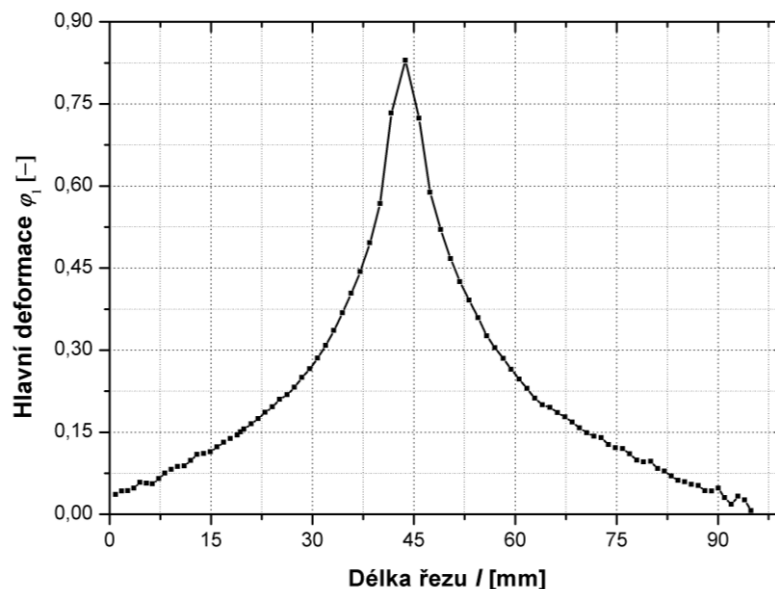


Obr. 3.3.2.10. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejší deformace φ_2 (červeně) pro přístřih o šířce 210 mm po provedeném výpočtu dle normy [25].

3.3.3. Tvorba DMP dle normy ISO/DIS 12004-2

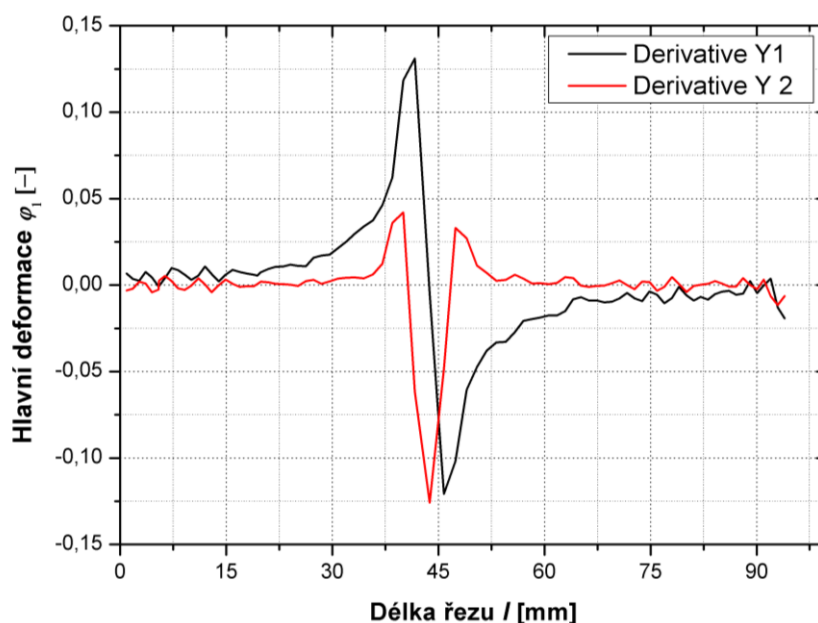
Jednotlivé kroky pro získání dat pro tvorbu výsledného DMP, podle kterého postupoval program Aramis (pro všechny deformační stopy byl postup totožný), zde budou předvedeny pomocí programu OriginPro 8. Jak už bylo výše napsáno, tento postup se provádí z důvodu nestabilního tváření za mezí pevnosti. Tímto postupem se zajistí ponížení KMP v DMP o hodnotu předpokládané lokalizované deformace ve směru tloušťky.

V následujících krocích bude uveden postup pouze pro získání hlavní deformace φ_1 (použité hodnoty v tomto ukázkovém postupu odpovídají přístříhu o šířce 30 mm). Postup získání vedlejší deformace φ_2 je shodný. Průběh naměřeného hlavní deformace φ_1 je zobrazen na obr. 3.3.3.3.



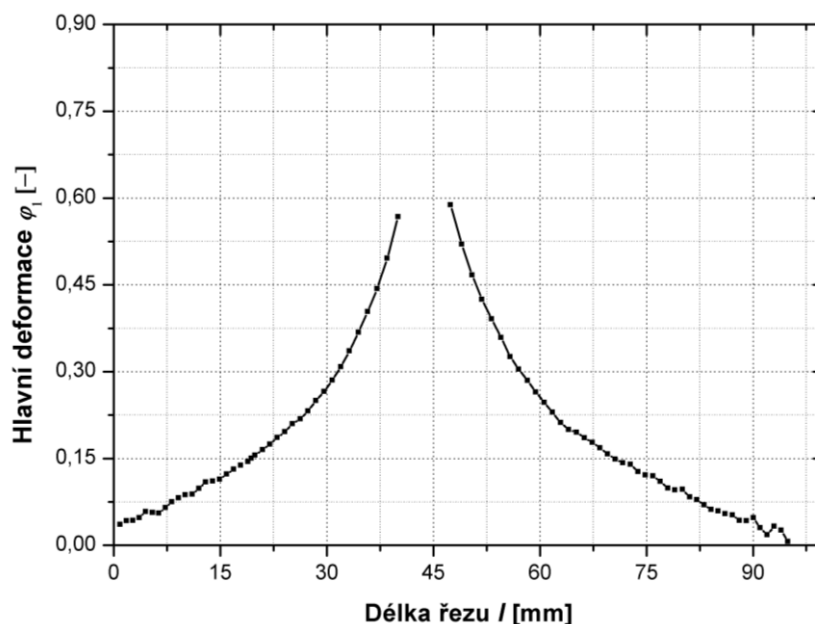
Obr. 3.3.3.3. Průběh deformace φ_1 zobrazeno v programu OriginPro 8.

V prvním kroku bylo zapotřebí získat lokální maxima, to bylo docíleno tak, že naměřená křivka (viz. obr. 3.3.3.3.) byla dvakrát derivována. Na obr. 3.3.3.4. je zobrazena první a druhá derivace původní křivky. Tímto byly nalezeny lokální maxima, dále se podle nich mohla oříznout původní křivka.



Obr. 3.3.3.4. Průběh první derivace (černě) a druhé derivace (červeně).

Podle získaných lokálních maxim, bude tedy původní křivka oříznuta, výsledek po oříznutí je zobrazen na obr 3.3.3.5.



Obr. 3.3.3.5. Oříznutí podle lokálních maxim druhé derivace.

Dále bylo zapotřebí provést výpočet bodů, které budou použity v konečném kroku. Tyto body budou proloženy inverzní parabolou. Jedná se o oříznutí křivky tentokrát z vnějších stran. Výpočet byl proveden dle následujících vztahů:

$$\varphi_{1m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{1l} + \varphi_{1r}), \quad (9)$$

kde: φ_{1l} – je hodnota vnitřního krajního bodu levé větve φ_1 ,
 φ_{1r} – je hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve φ_1 ,

$$\varphi_{2m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{2l} + \varphi_{2r}), \quad (10)$$

kde: φ_{2l} – je hodnota vnitřního krajního bodu levé větve φ_2 ,
 φ_{2r} – je hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve φ_2 ,

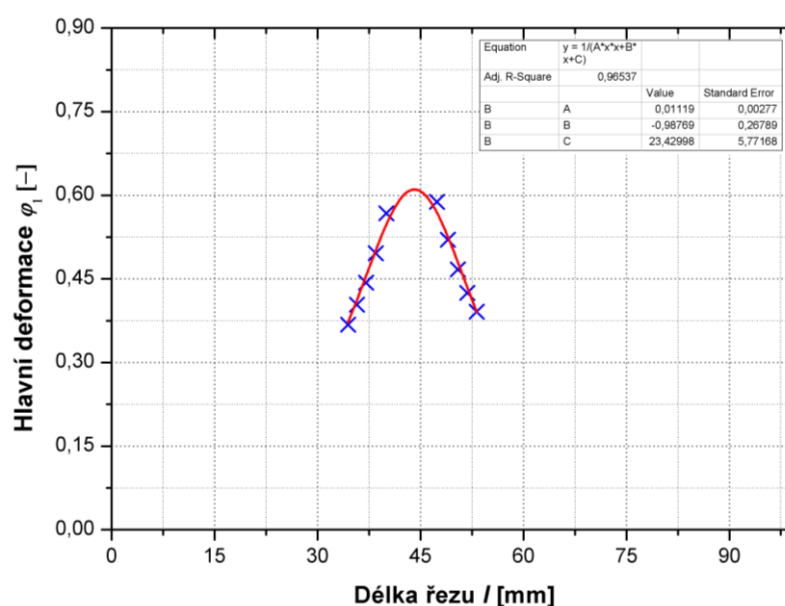
$$w = 10 \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{2m}}{\varphi_{1m}}\right), \quad (11)$$

kde: w – počet bodů,
 φ_{1m} – je průměrná hodnota krajních bodů φ_1 ,
 φ_{2m} – je průměrná hodnota krajních bodů φ_2 .

Popisovaný výpočet nám tedy stanovil konečný počet bodů, v tomto postupu byl pro názornost zvolen počet bodů $w = 5$. Na obrázku 3.3.3.6. je zobrazeno proložení bodů inverzní parabolou, která je popsána následujícím vztahem:

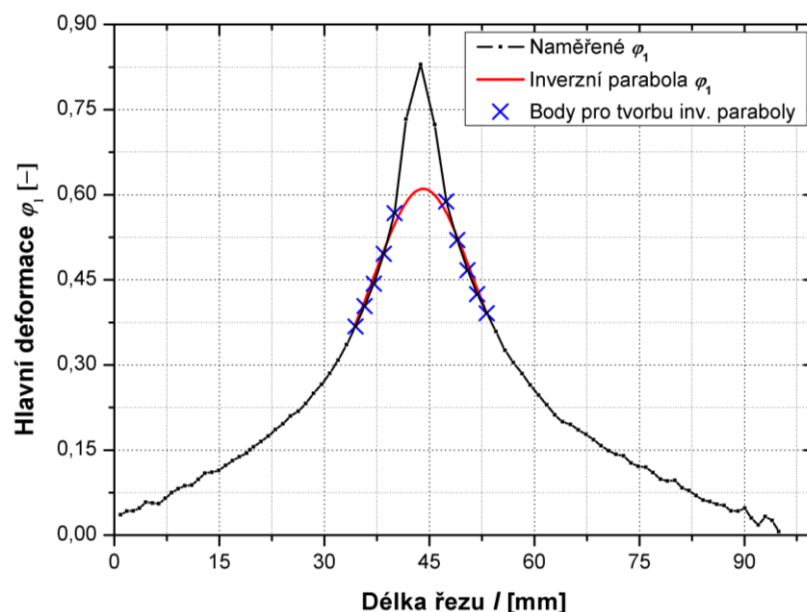
$$y = \frac{1}{A \cdot x^2 + B \cdot x + C}, \quad (12)$$

kde: A, B, C jsou parametry.



Obr. 3.3.3.6. Vypočítané body (modře) proloženy inverzní parabolou.

Tento vztah pro inverzní parabolou se musel do programu OriginPro 8 nadefinovat, neboť v něm nebyl zahrnut. Po provedení tohoto kroku bylo dosaženo výsledku v podobě maxima inverzní paraboly (viz. obr. 3.3.3.6.). Provedením stejného postupu i pro φ_2 by byly získány dvojice hodnot $[\varphi_1, \varphi_2]$, které lze následně vynést do výsledného DMP. Diagram se uvádí v závislosti φ_1 na φ_2 .



Obr. 3.3.3.7. Konečné porovnání naměřeného φ_1 (černě) spolu s poníženým φ_1 v podobě inverzní paraboly (červeně) dle normy [25].

Graf na obrázku 3.3.3.7. představuje porovnání křivky naměřené hlavní deformace φ_1 s křivkou inverzní paraboly, která byla získána podle již popsaného postupu. Z grafu je vidět, že původní naměřená hodnota hlavní deformace (černě) byla ponížena na křivku v podobě inverzní paraboly (červeně).

3.3.4. Bulge test

Pro pravou větev DMP (konkrétně pro přístřih o šířce 210 mm) byly použity naměřené hodnoty z Bulge testu (viz tab. 3.3.4.1.). Tento krok byl proveden z toho důvodu, aby mohly být do DMP zaneseny pokud co nejpřesnější data pro tuto deformační stopu. Vzájemné porovnání naměřených hodnot je zobrazen na obr. 3.3.4.3. V tomto grafu jsou zanesena data, která byla naměřena pomocí tažníku o průměru 100 mm (viz. kap. 3.3.2.) v podobě jednoho bodu (modrý trojúhelník), který udává průměrnou hodnotu z provedených pěti měření. Jako druhý zobrazený bod (červený čtverec) v grafu jsou data získaná právě pomocí Bulge testu, také tento bod představuje průměrnou hodnotu z pěti provedených měření.

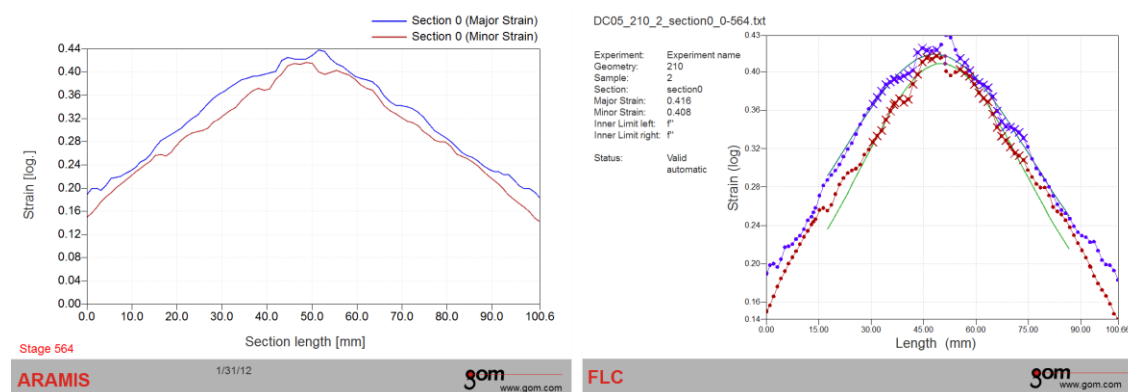
Výhodou Bulge testu je eliminace tření v oblasti vrchlíku. U této metody odpadávají problémy s tvorbou trhliny mimo vrchlík. To je docíleno tím, že pro

vypínání zkušebních vzorků je použita kapalina (olej) namísto klasického tažníku. Z tohoto důvodu se mezi tvářeným plechem a kapalinou neprojevuje tření, jako je tomu v případě klasického tažení. K porušení vlivem lokálních zúžení ve směru tloušťky zpravidla dochází přímo v kulovém vrchlíku zkušební vzorku. To lze pozorovat na obrázku 3.3.4.2. v okamžiku těsně před porušením. Na obrázku 3.3.4.1. jsou zobrazeny výstupní protokoly z programu Aramis.

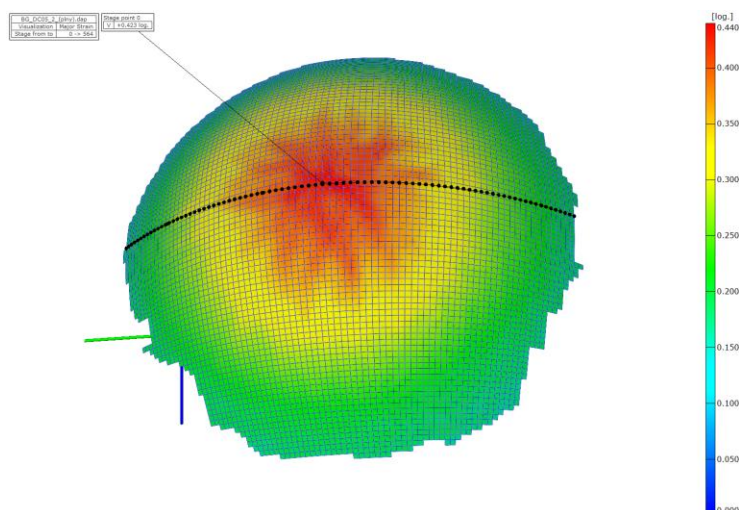
Poněvadž není tato diplomová práce zaměřena na popisování metody Bulge testu, tak zde už více nebude popisována. Touto metodou se zabývá např. publikace [26].

Tab. 3.3.4.1. Naměřená data pomocí Bulge testu pro přístřih o šířce 210 mm.

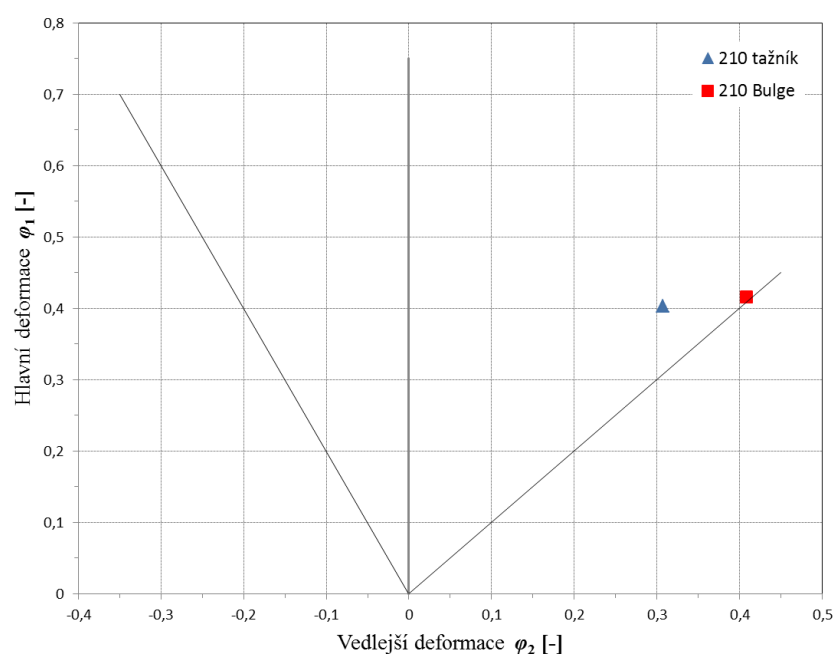
Geometrie zkušebních těles b [mm]	Přetvoření φ [-]	Max. naměřená hodnota φ [-]	Mezní def. vypočítaná dle normy φ [-]
210	Hlavní deformace φ_1	$0,428 \pm 0,009$	$0,416 \pm 0,003$
	Vedlejší deformace φ_2	$0,417 \pm 0,008$	$0,405 \pm 0,005$



Obr. 3.3.4.1. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejší deformace φ_2 (červeně). Vlevo naměřená deformace. Vpravo výpočet dle normy [25].



Obr. 3.3.4.2. Rozložení hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny.

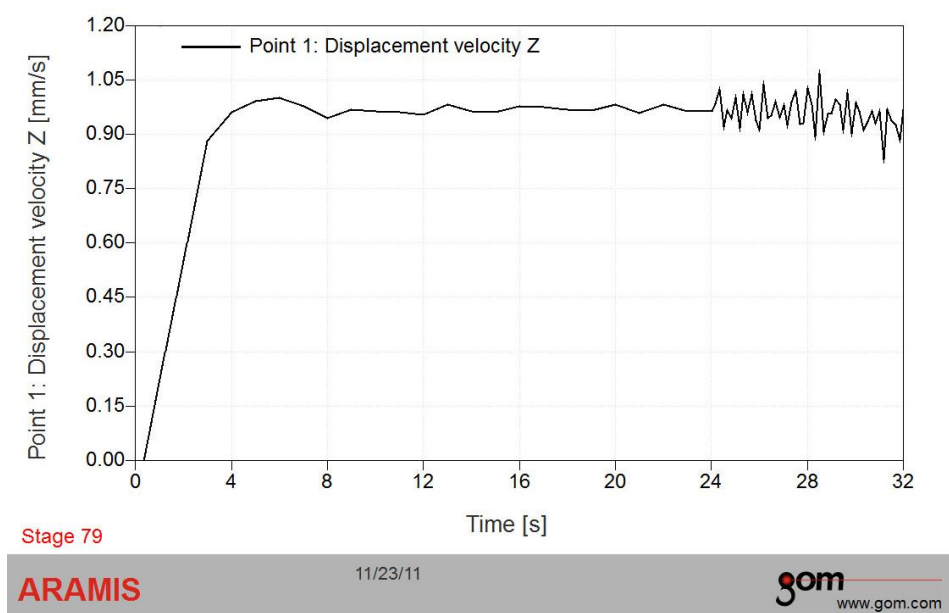


Obr. 3.3.4.3. Porovnávací graf naměřených dat pomocí tažníku o průměru 100 mm (bod modře) a pomocí Bulge testu (bod červeně).

3.3.5. Posun tažníku

Rychlost posunu tažníku byla ověřena softwarově pomocí programu Aramis. Na zkušební vzorek o šířce přístříhu 30 mm byl do místa vrchlíku přidán bod. Pomocí tohoto bodu byl proveden výpočet. Následně byl vyexportován graf s celým průběhem rychlosti tvářecího nástroje. Z průběhu rychlosti na obr. 3.3.5.1. je patrné, že se rychlost tváření pohybovala na hranici 1 mm/s. Tímto se ověřila předem nastavená rychlost na stroji, která byla právě 1 mm/s. Tato rychlost je v souladu

s normou [25]. Křivka rychlosti není za hranicí 24 s plynulá jako do této hranice. To by mohlo být způsobeno lokální deformací nebo také třením (zadíráním tvářeného materiálu o nástroj). Tato rychlost posunu tažníku byla stejná pro všechny vzorky, neboť se nastavení stroje během experimentu neměnilo.



Obr. 3.3.5.1. Průběh rychlosti posunu tažníku.

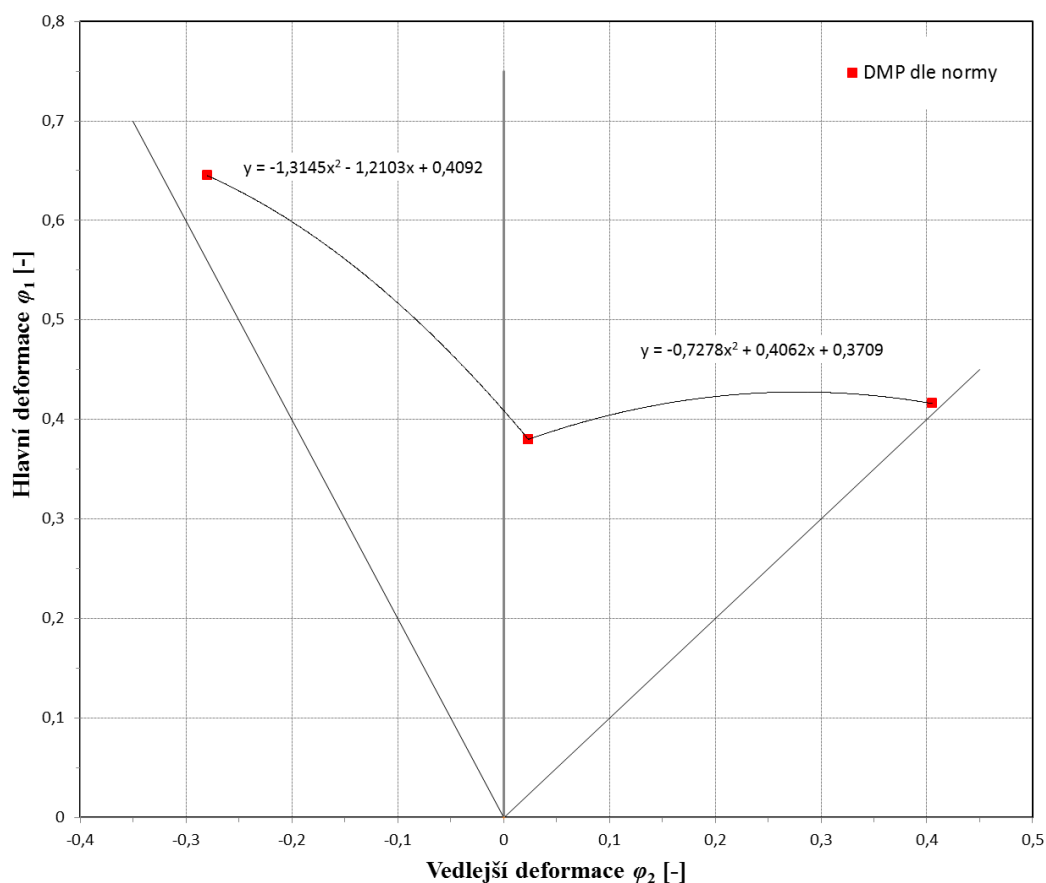
3.3.6. Výsledný DMP

V této kapitole bude uvedena tabulka hodnot, kde budou uvedeny střední aritmetické průměry spolu s výběrovými směrodatnými odchylkami. Dále zde bude uveden výsledný graf (viz. obr. 3.3.6.1.) sestavený podle hodnot z tabulky 3.3.6.1. s výjimkou přístřihu o šířce 210 mm. Pro tento přístřih byly použity hodnoty z tabulky 3.3.4.1. Na vyobrazeném grafu jsou vyneseny body zpracovány podle [25], které byly následně proloženy regresní křivkou. Byla zvolena polynomická funkce druhého řádu pro obě větve DMP. Vzniklá křivka představuje KMP zkoušeného materiálu. Pod touto křivkou se vymezila oblast pro bezpečné tváření.



Tab. 3.3.6.1. Hodnoty deformací pro tvorbu DMP dle normy.

Geometrie zkušebních těles b [mm]	Přetvoření φ [-]	Max. naměřená hodnota φ [-]	Mezní def. vypočítaná dle normy φ [-]
30	Hlavní deformace φ_1	$0,844 \pm 0,022$	$0,645 \pm 0,011$
	Vedlejší deformace φ_2	$-0,306 \pm 0,013$	$-0,280 \pm 0,007$
120	Hlavní deformace φ_1	$0,515 \pm 0,015$	$0,380 \pm 0,012$
	Vedlejší deformace φ_2	$0,027 \pm 0,010$	$0,024 \pm 0,006$
210	Hlavní deformace φ_1	$0,421 \pm 0,015$	$0,409 \pm 0,036$
	Vedlejší deformace φ_2	$0,331 \pm 0,013$	$0,316 \pm 0,012$

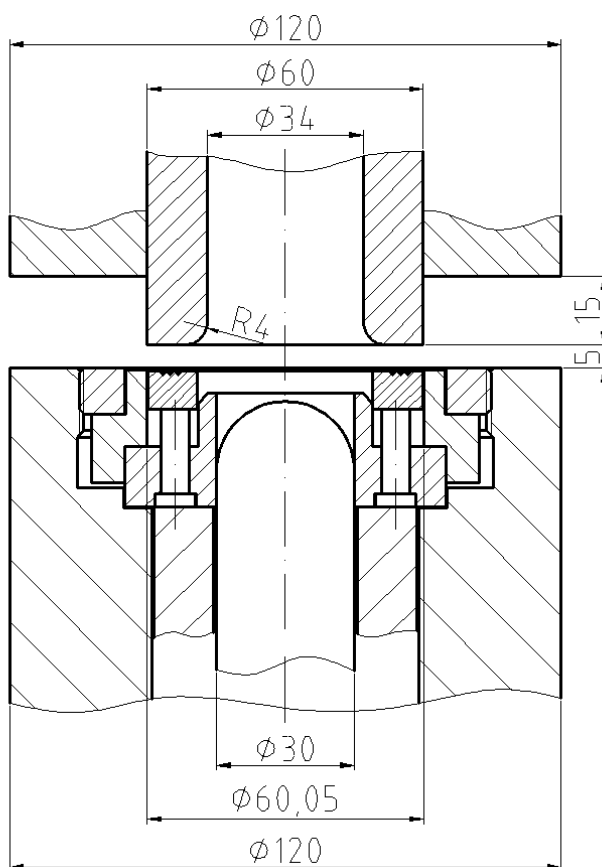


Obr. 3.3.6.1. Graf zobrazující konečný průběh KMP, data získaná pomocí tažníku o průměru 100 mm (přístříhy o šířkách 30 a 120 mm) a pomocí Bulge testu (přístříh o šířce 210 mm).

3.4. Diagram mezních přetvoření zjišťovaný pomocí zařízení pro určování hlubokotažnosti (TZP)

Pro naměření diagramu mezních přetvoření bylo použito zařízení pro určování hlubokotažnosti spolu s bezkontaktním optickým měřicím systémem Aramis. Při této metodě byly použity zkušební vzorky o průměru 60 mm. Zkušební stroj TZP byl už představen v kapitole 2.5.1. K získání DMP byla taktéž použita metoda vypínání tvarových vzorků polokulovým tažníkem (o průměru 30 mm). Řez nástrojem je zobrazen na obrázku 3.4.1.

Snaha o měření DMP na stroji TZP byla zkoumána hlavně z důvodu ulehčení a urychlení práce při získávání DMP. Po přípravě zkušebních vzorků by bylo možno měřit přímo v laboratoři a celý proces by se časově zkrátil. Jako jednu z dalších výhod lze uvést úsporu materiálu, neboť se zde pracuje s menšími přístřihy. Popis celého experimentu je popsán v následujících kapitolách.



Obr. 3.4.1. Řez tvářecím nástrojem.

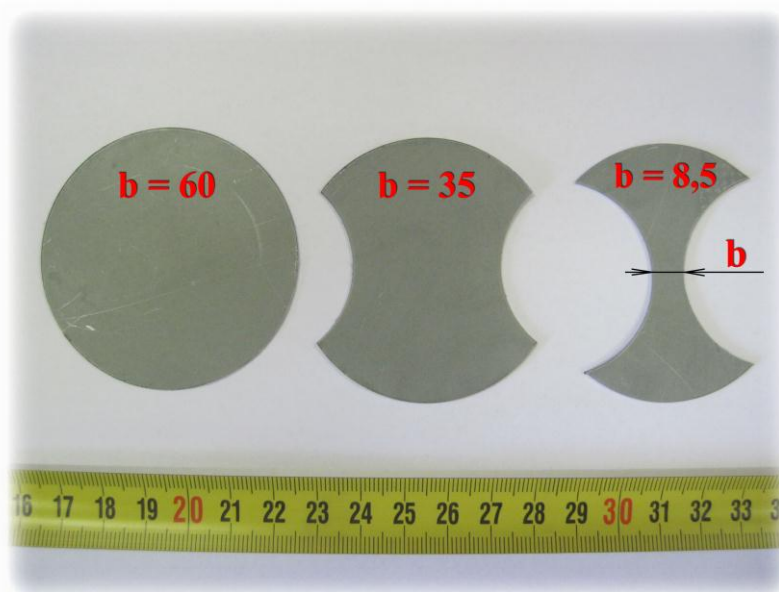
3.4.1. Příprava zkušebních vzorků

Příprava proběhla obdobně jako při získávání vzorků pro diagram mezních přetvoření dle normy (viz. kap. 3.3.1.), jediný rozdíl byl ve velikosti přístřihu. Zde se jednalo o přístřih o průměru 60 mm. Pro tuto metodu byly zvoleny také tři deformační stopy. Pro každou deformační stopu bylo zhotoveno pět zkušebních vzorků. V této práci se jedná pouze o porovnání dvou DMP, a proto byly tyto deformační stopy zvoleny tak, aby pokryly stavy přetvoření $m_{\varphi} = -0,5$, $m_{\varphi} = 0$ a $m_{\varphi} = 1$. Tak tomu bylo i v metodě určování DMP podle normy (viz. kap. 3.3.). Tímto krokem by mělo být docíleno objektivního porovnání obou metod. Šířka vzorků b (viz. obr. 2.4.2.2.) byla vypočítána z rozměrů vzorků používaných při měření DMP podle normy (viz. tab. 3.4.1.1.). V obou případech nám byl znám max. průměr přístřihu ($b = 210$ mm a $b = 60$ mm). Poměrem těchto hodnot byl vypočítán koeficient ($k = 3,5$), pomocí kterého byly určeny chybějící rozměry. Výpočet šířky b pro vzorek č. 1 byl proveden dle následujícího postupu:

$$b = \frac{30}{3,5} \doteq 8,5 \text{ [mm]}. \quad (13)$$

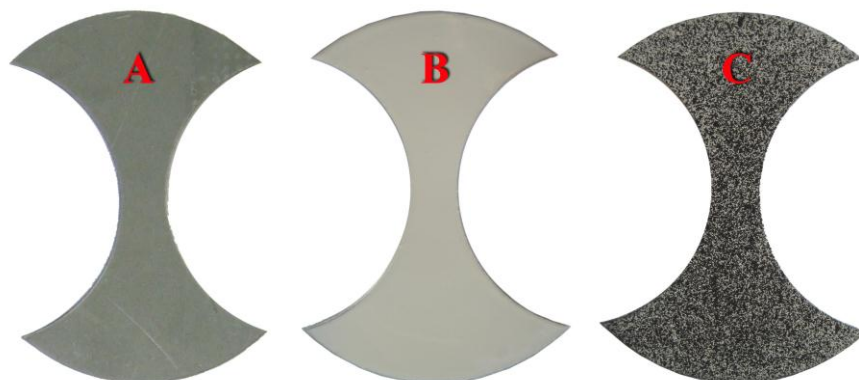
Tab. 3.4.1.1. Určení velikosti šířky přístřihů b zkušebních vzorků.

Vzorky	DMP dle normy šířka b [mm]	DMP pomocí TZP šířka b [mm]
1	30	8,5
2	120	35
3	210	60



Obr. 3.4.1.1. Přístřihy zkušebních vzorků s uvedenými šířkami b [mm].

Na zkušební vzorky (viz. 3.4.1.1.) byl nanesen pattern. Postup nanesení patternu je již popisován v kapitole 3.3.1. Jednotlivé kroky jsou patrné z obrázku 3.4.1.2., kde je zobrazen vzorový zkušební vzorek o šířce přístřihu 8,5 mm.



Obr. 3.4.1.2. Zkušební vzorek o šířce přístřihu 8,5 mm, A – čistý plech, B – plech nastříkán bílou barvou, C – plech s již hotovým patternem.

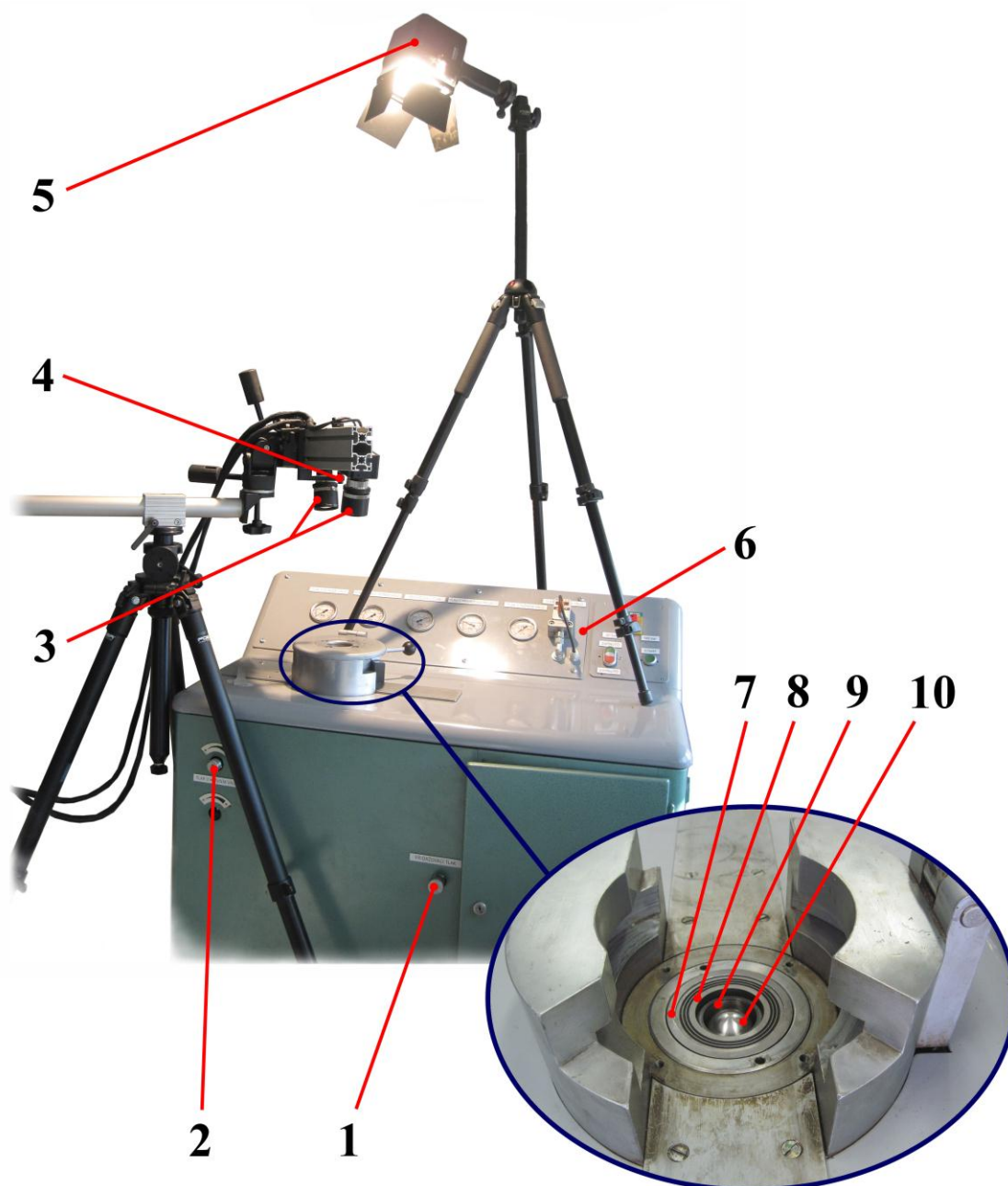
3.4.2. Příprava zkušebního zařízení a měření DMP

V první řadě bylo zapotřebí ke stroji nainstalovat optický bezkontaktní měřicí systém Aramis společně s vhodným osvětlením. Při kalibraci měřícího zařízení se ale vyskytl problém v podobě vhodného nasvícení zkušební vzorku v nástroji. Kamery systému Aramis zaznamenaly v místě měření odlesk, a takto by nebylo možné celý děj správně nasnímat. To bylo pravděpodobně způsobeno tělem bajonetového uzávěru nástroje (příliš hluboký). Tento problém měl být vyřešen použitím LED osvětlení. Jenže výsledek byl ještě nepříznivější, než při předchozím použití halogenového osvětlení. LED osvětlení nebylo dostatečně intenzivní. Proto se znovu vyzkoušel halogenový reflektor. Po mnoha změnách poloh reflektoru se podařilo najít vyhovující konečnou polohu. Celá situace uspořádání pracoviště je zobrazena na obrázku 3.4.2.2. Součástí měřícího systému Aramis byl trigger společně s PC pro vyhodnocování zkoušek (viz. obr. 3.4.2.1.).

Mazání vzorků před zkouškou proběhlo stejným způsobem jako v již popsaném postupu v kapitole 3.3.1. Poté byl vzorek založen do nástroje a ten byl uzavřen bajonetovým uzávěrem. V tomto okamžiku mohla být zkouška spuštěna.

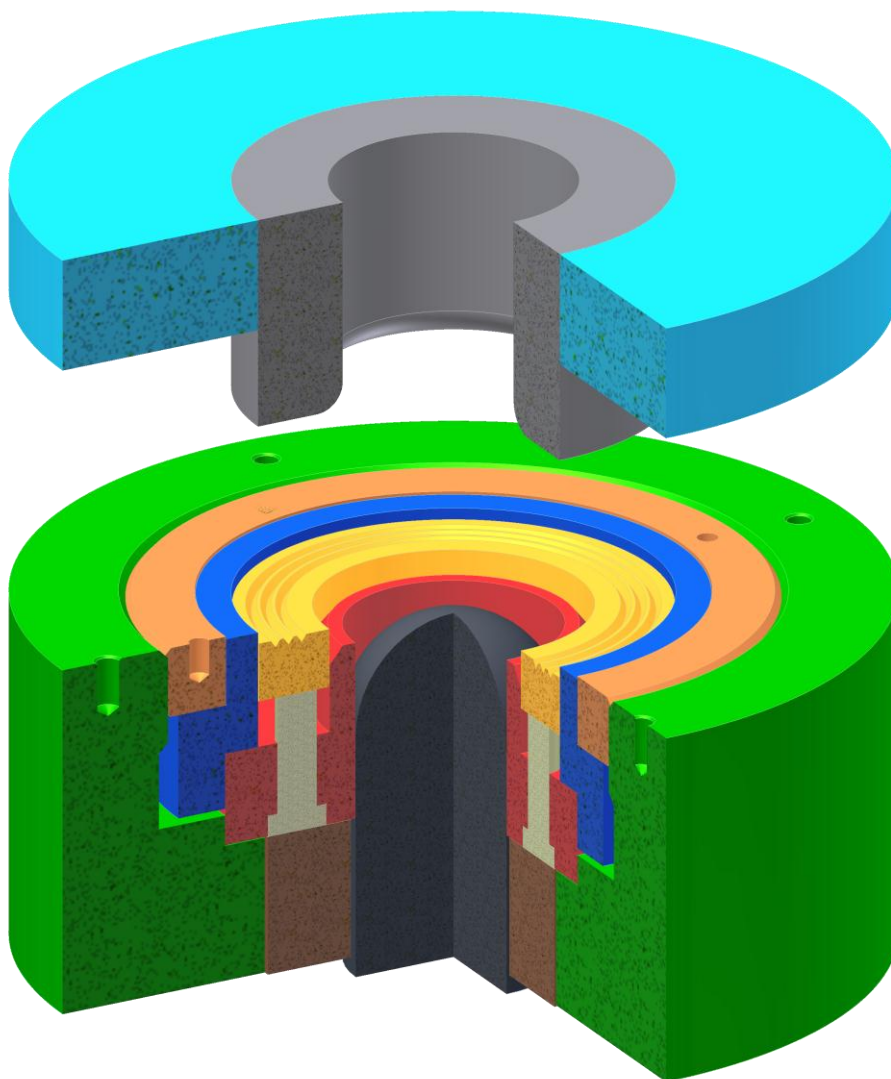


Obr. 3.4.2.1. T-box (trigger) společně s PC.



Obr. 3.4.2.2. Situace při měření na zkušebním zařízení TZP.

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1) Ovládání přidržovacího tlaku | 6) Ovládací a kontrolní panel |
| 2) Ovládání tlaku v hlavním válci | 7) Ostřihovací kroužek (střížník) |
| 3) Dvě kamery optického systému Aramis | 8) Přidržovací kroužek |
| 4) Zaměřovací laser | 9) Zasekávající přidržovací kroužek |
| 5) Halogenové osvětlení | 10) Polokulový tažník |



Obr. 3.4.2.3. 3D model nástroje.

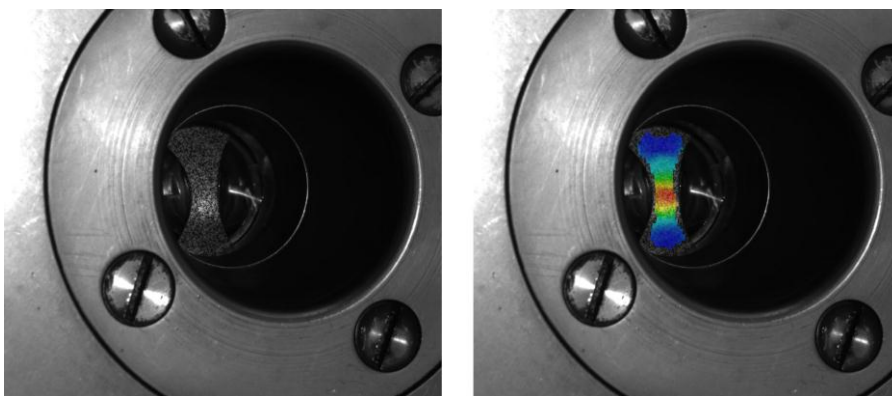
Do přístříhu, který byl pevně sevřen v oblasti příruby, najel polokulový tažník o průměru 30 mm. Přesná posloupnost pohybů všech částí nástroje byla již popsána v teoretické části v kapitole 2.5.1. Zmíněný postup se liší v jednom bodě, a to ve stříhání zkušební vzorku. Zde nebyl zkušební vzorek vystřižen ze založeného pásu plechu. Už vyhotovený zkušební vzorek opatřený patternem byl vložen na příslušné místo do nástroje, poté už bylo vše stejné. Pro lepší představu byl nástroj rozebrán, změřen a vymodelován v programu Inventor 2010 (viz. obr. 3.4.2.3.).

Optický měřicí systém Aramis byl spuštěn souběžně se spuštěním stroje. Měřicí frekvence kamer byla nastavena na 6 Hz, rychlost posunu tažníku bude popsána v kapitole 3.4.5. Měření bylo ukončeno po detekci první trhliny na vzorku podle [25].

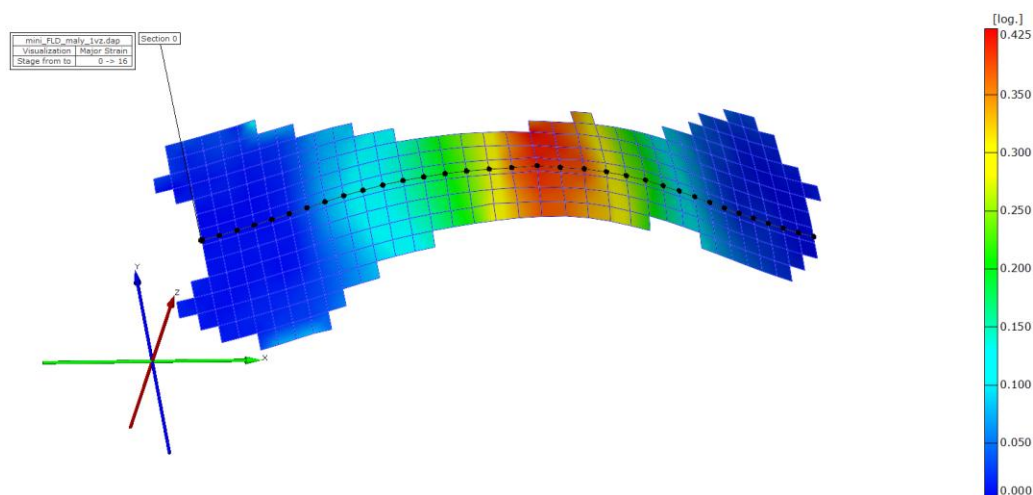
3.4.3. Vyhodnocení měření

Vyhodnocení naměřeného experimentu proběhlo stejným způsobem jako v kapitole 3.3.2. Proto zde už nebude znovu popisováno. Jediným rozdílem bylo, že se programu Aramis nepodařilo u některých zkušebních vzorků vypočítat z naměřených dat požadovanou mezní deformaci φ_1 a φ_2 dle normy. To bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečným počtem naměřených dat. To bylo zapříčiněno tím, že byl měřen přístřih o šířce 60 mm, který je 3,5 krát menší než použitý přístřih o šířce 210 mm u metody podle normy. Z toho vyplývá, že program Aramis měl k dispozici 3,5 krát menší počet fazetek k výpočtu. Proto naměřená data nebyla korektní pro požadovaný výpočet deformací φ_1 a φ_2 dle normy.

Na obrázku 3.4.3.1. je zobrazen pohled levou kamerou do nástroje, kde je zobrazen zkušební vzorek o šířce přístřihu 8,5 mm. Dále je pak na obrázku 3.4.3.2. zobrazena naměřená hlavní deformace φ_1 . Na obrázku 3.4.3.3. je zobrazena naměřená hlavní deformace φ_1 pro zkušební vzorek o šířce přístřihu 35 mm.

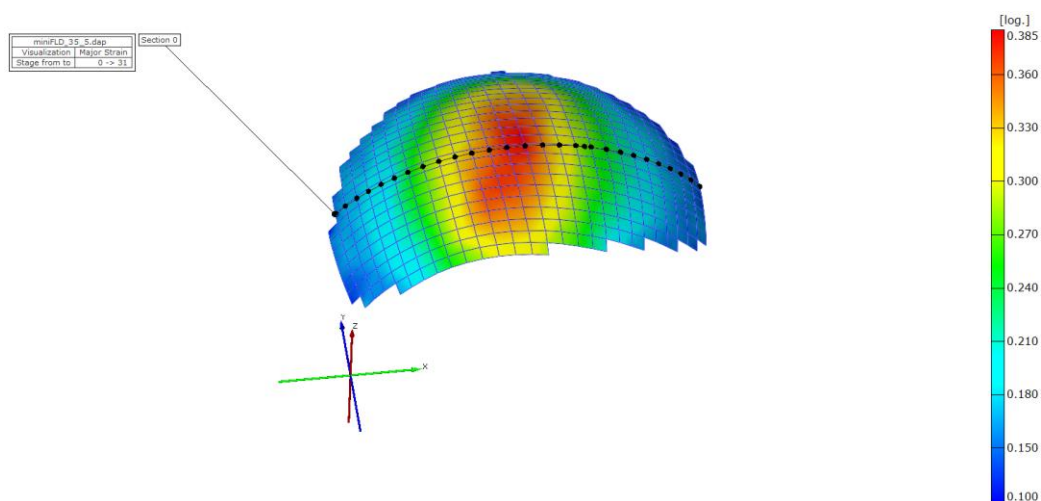


Obr. 3.4.3.1. Vlevo zobrazení zkušebního vzorku (šířka přístřihu 8,5 mm) optickou kamerou v okamžiku těsně před vznikem trhliny, na pravém obrázku je navíc zobrazeno barevné rozložení deformace, také těsně před vznikem trhliny.



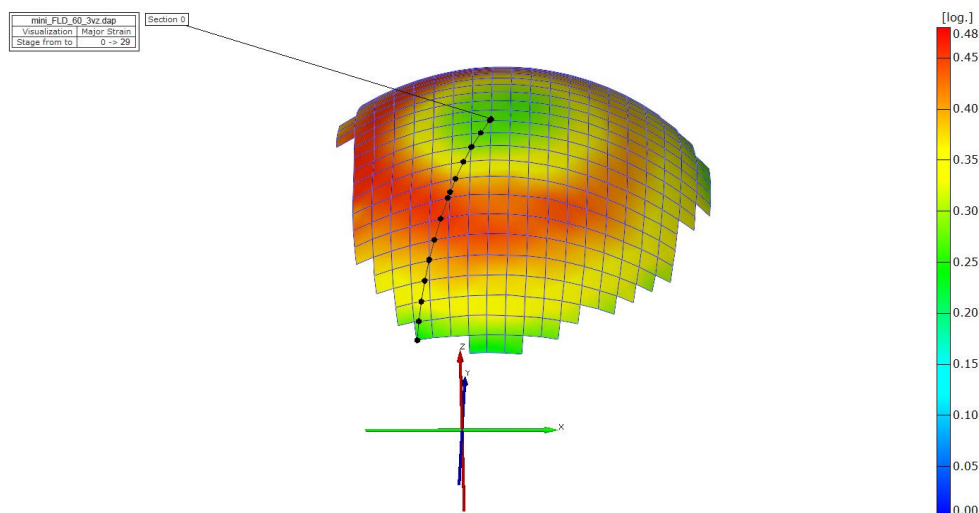
Obr. 3.4.3.2. Rozložení hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny na zkušebním vzorku o šířce přístřihu 8,5 mm.

V případě zkušebních vzorků o šířce přístřihu 8,5 mm a 35 mm se nepodařilo programu Aramis vypočítat z naměřených dat deformací φ_1 a φ_2 dle normy, tímto se bude zabývat následující kapitola, kde bude uveden způsob jejich získání.

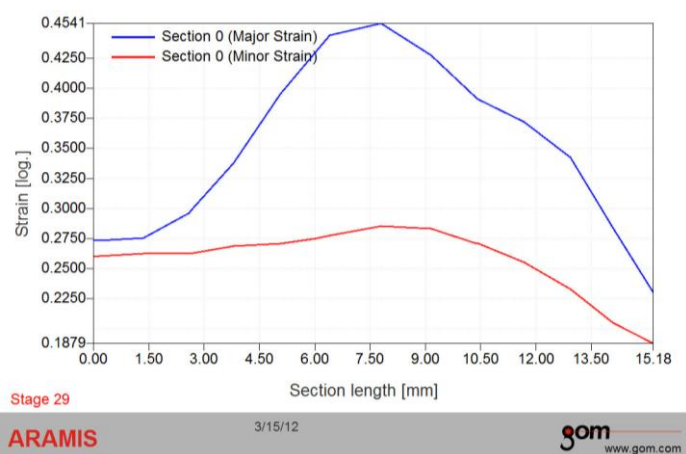


Obr. 3.4.3.3. Rozložení hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny na zkušebním vzorku o šířce přístřihu 35 mm.

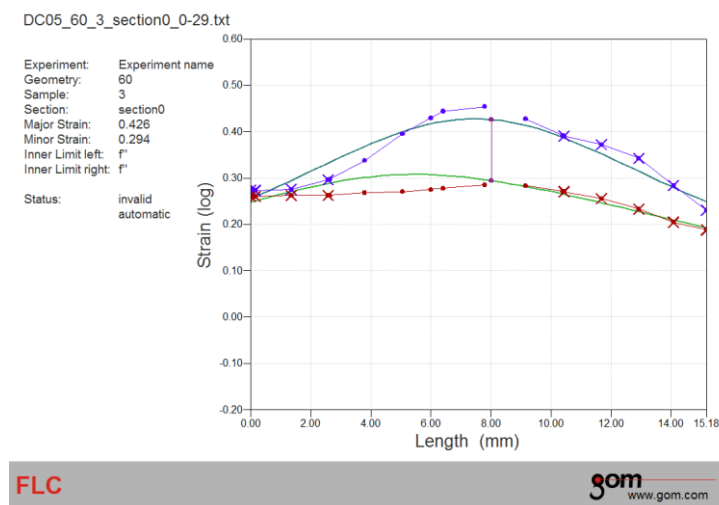
Výjimkou se staly zkušební vzorky o šířce přístřihu 60 mm, u kterých se podařilo programu Aramis vypočítat obě deformace φ_1 a φ_2 dle normy. Rozložení hlavní deformace φ_1 je zobrazeno na obr. 3.4.3.4. Výstupní protokoly jsou zobrazeny na obrázcích 3.4.3.5. a 3.4.3.6.



Obr. 3.4.3.4. Rozložení hlavní deformace φ_1 v okamžiku těsně před vznikem trhliny na zkušební vzorku o šířce přístřihu 60 mm.



Obr. 3.4.3.5. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejší deformace φ_2 (červeně) pro zkušební vzorek o šířce přístřihu 60 mm.



Obr. 3.4.3.6. Rozložení hlavní deformace φ_1 (modře) a vedlejší deformace φ_2 (červeně) pro zkušební vzorek o šířce přístřihu 60 mm po provedeném výpočtu dle normy [25].

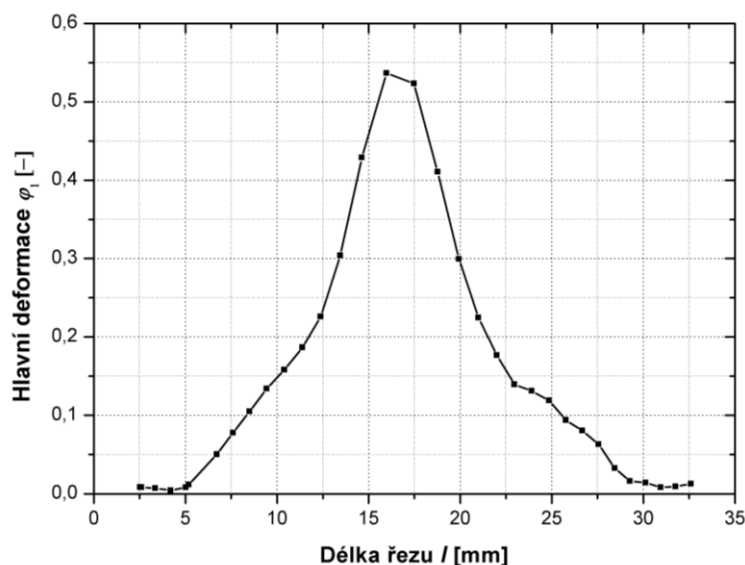


Obr. 3.4.3.2. Ukázka porušení vzorků, na obrázku vlevo pro přístřih o šířce 60 mm a vpravo pro přístřih o šířce 8,5 mm.

3.4.4. Postup získání dat pro sestavení DMP

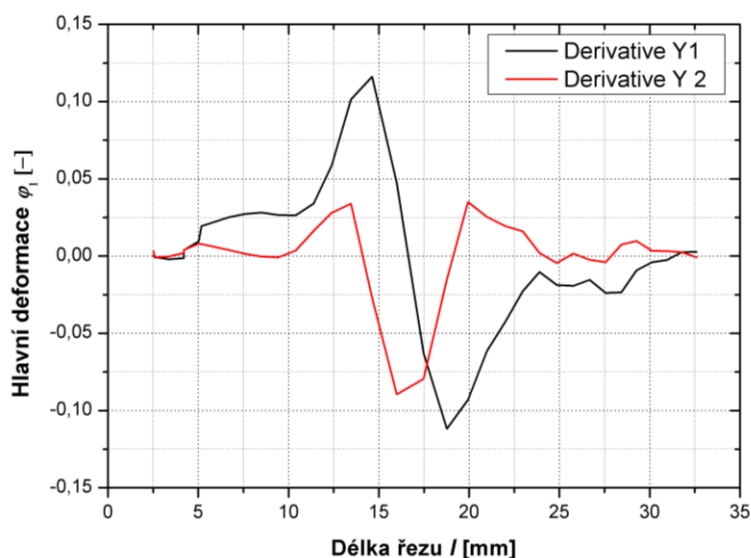
Získání dat pro sestavení DMP bylo v tomto případě poněkud komplikovanější než v kapitole 3.3.3. Jak už bylo napsáno, programu Aramis se nepodařilo pro zkušební vzorky o šířce přístřihu 8,5 a 35 mm vypočítat konečné mezní hodnoty φ_1 a φ_2 . To se povedlo pouze v případě zkušebních vzorků o šířce přístřihu 60 mm. Pro získání chybějících hodnot se využil program OriginPro 8, ve kterém byl proveden výpočet mezních hodnot φ_1 a φ_2 podle normy. Dále bude předveden postup pouze pro zkušební vzorek o šířce přístřihu 8,5 mm.

V první řadě bylo zapotřebí vyexportovat naměřená data z programu Aramis. Poté je nainportovat do programu OriginPro 8 a vytvořit graf (viz. obr. 3.4.4.2.). Na tomto obrázku se jedná o rozložení naměřené hlavní deformace φ_1 pro vzorek č. 3. o šířce přístřihu 8,5 mm. Jelikož je postup výpočtu shodný pro obě deformace φ_1 a φ_2 , tak zde bude uveden pouze pro φ_1 .



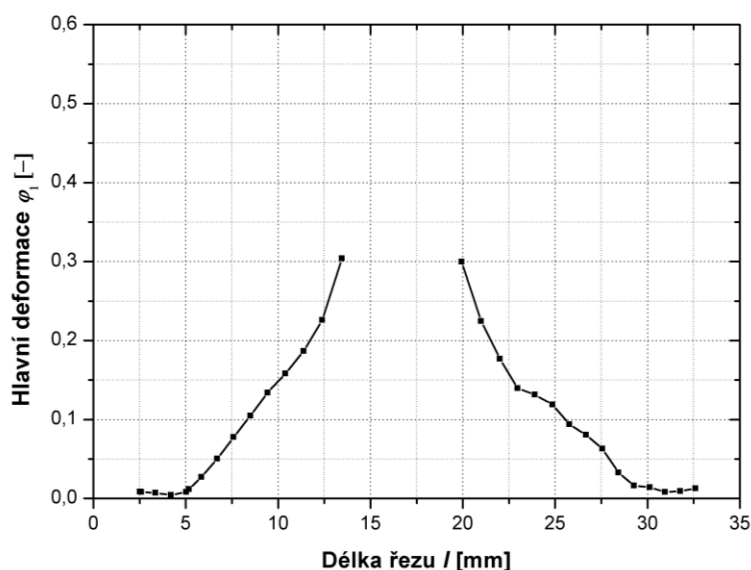
Obr. 3.4.4.2. Průběh naměřené deformace φ_1 zobrazeno v programu OriginPro 8.

V dalším kroku bylo nutné získaný graf hlavní deformace φ_1 dvakrát numericky derivovat. Po tomto kroku dostaneme lokální maxima (viz. obr. 3.4.4.3.). Ty nám vymezí oblast grafu na dvě části, s jednou z nich se už dále nebude pracovat. V tomto případě bude oříznuta vnitřní část grafu.



Obr. 3.4.4.3. Průběh první derivace (černě) a druhé derivace (červeně).

Podle získaných lokálních maxim bude tedy původní křivka oříznuta a to je zobrazeno na obr. 3.4.4.4.



Obr. 3.4.4.4. Oříznutí podle lokálních maxim druhé derivace.

Dále bylo zapotřebí provést výpočet bodů, které budou použity ke konečnému výpočtu. Jedná se o oříznutí původní křivky tentokrát z vnějších stran. Výpočet byl proveden dle následujících vzorců:

$$\varphi_{1m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{1l} + \varphi_{1r}) = \frac{1}{2} \cdot (0,3040 + 0,2996) = \underline{0,3018}, \quad (14)$$

kde: φ_{1l} – je hodnota vnitřního krajního bodu levé větve φ_1 ,

φ_{1r} – je hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve φ_1 ,

$$\varphi_{2m} = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{2l} + \varphi_{2r}) = \frac{1}{2} \cdot (-0,0656 - 0,1398) = \underline{-0,1027}, \quad (15)$$

kde: φ_{2l} – je hodnota vnitřního krajního bodu levé větve φ_2 ,

φ_{2r} – je hodnota vnitřního krajního bodu pravé větve φ_2 ,

$$w = 10 \cdot \left(1 + \frac{\varphi_{2m}}{\varphi_{1m}}\right) = 10 \cdot \left(1 + \frac{-0,1027}{0,3018}\right) = \underline{\underline{6,6}}, \quad (16)$$

kde: w – počet bodů,

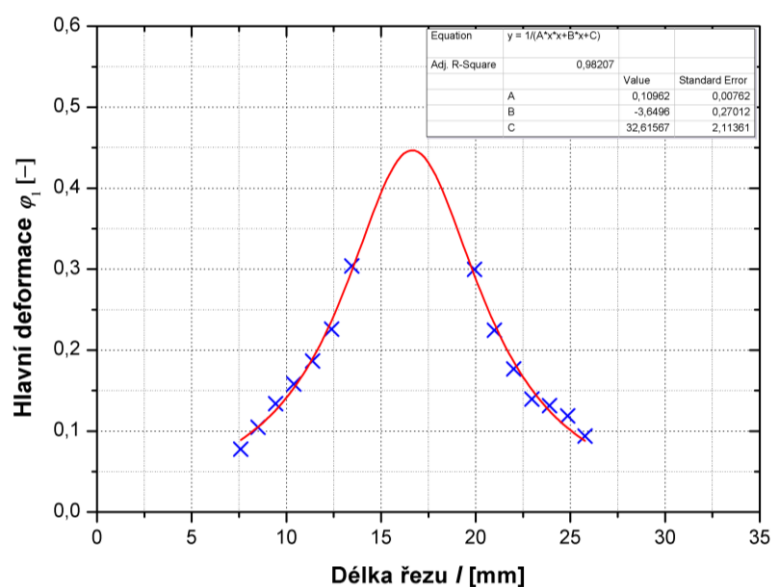
φ_{1m} – je průměrná hodnota krajních bodů φ_1 ,

φ_{2m} – je průměrná hodnota krajních bodů φ_2 .

Podle výpočtu nám tedy vyšlo $w = 6,6$ bodů, a proto bylo zvoleno 7 bodů pro konečný výpočet (viz. obr. 3.4.4.5.). Posledním krokem tohoto postupu bylo proložení získaných bodů inverzní parabolou podle následujícího vztahu:

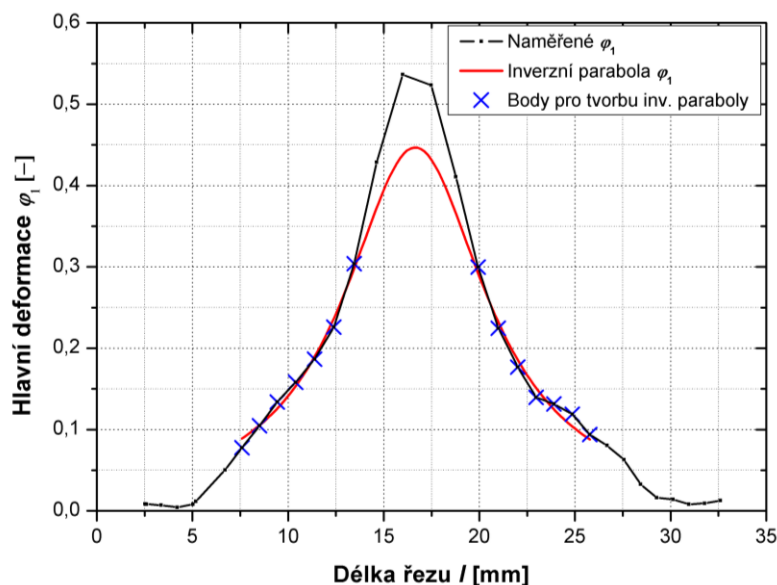
$$y = \frac{1}{A \cdot x^2 + B \cdot x + C}, \quad (17)$$

kde: A,B,C jsou parametry.



Obr. 3.4.4.5. Body proloženy inverzní parabolou.

Tento vztah pro inverzní parabolou se musel do programu OriginPro 8 nadefinovat, neboť v něm nebyl zahrnut. Po provedení tohoto kroku bylo dosaženo výsledku v podobě maxima inverzní paraboly (viz. obr. 3.4.4.5.). Provedením stejného postupu i pro φ_2 byly získány dvojice hodnot $[\varphi_1, \varphi_2]$, které lze následně vynést do výsledného DMP.



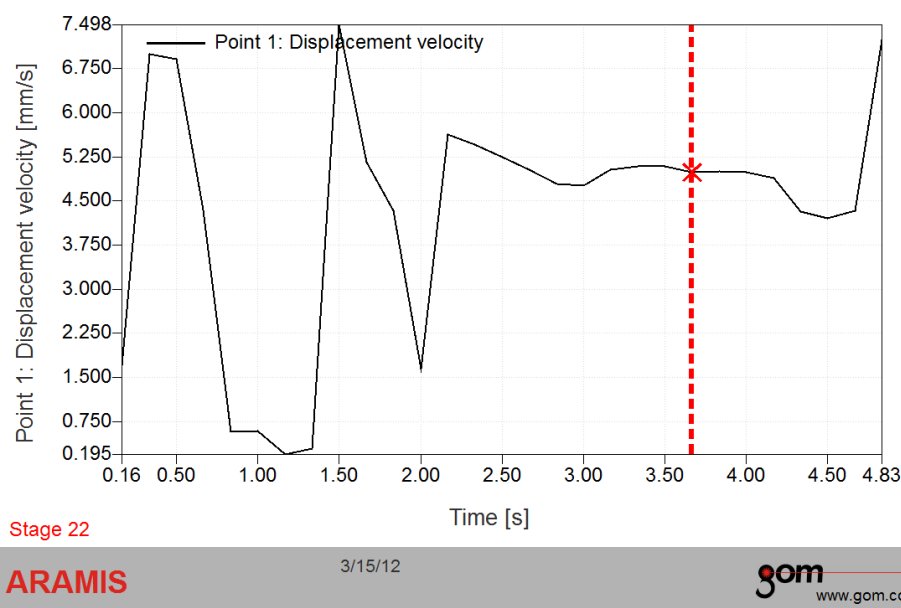
Obr. 3.4.4.6. Konečné porovnání naměřeného φ_1 (černě) spolu s poníženým φ_1 dle normy [25] (červeně).

Graf na obrázku 3.4.4.6. představuje porovnání křivky naměřené hlavní deformace φ_1 s křivkou inverzní paraboly, která byla získána podle již popsaného postupu. Z grafu je vidět, že původní naměřená hodnota hlavní deformace $\varphi_1 = 0,536$ [-] (černě) byla ponížena o 16,8 % na konečnou hodnotu $\varphi_1 = 0,446$ [-] (červeně). Získané hodnoty jsou souhrnně uvedeny v tabulce 3.4.6.1, ze kterých byl následně sestaven výsledný DMP.

3.4.5. Posun tažníku

Rychlost posunu tažníku byla zjištěna softwarově pomocí programu Aramis, ve kterém byl softwarově do místa vrchlíku na zkušební vzorku přidán bod. Pomocí tohoto bodu byl proveden výpočet. Následně byl vyexportován graf s celým průběhem rychlosti tvářecího nástroje.

Ze získaného grafu (obr. 3.4.5.1.) není patrné, jaká část představuje okamžik tažení zkušební vzorku. Samotné tažení probíhá v čase až od 2 s. Před tažením probíhají děje, které jsou v přesné posloupnosti popsány v kapitole 2.5.2. Rychlost posuvu tažníku byla tedy stanovena na průměrných 5 mm/s.



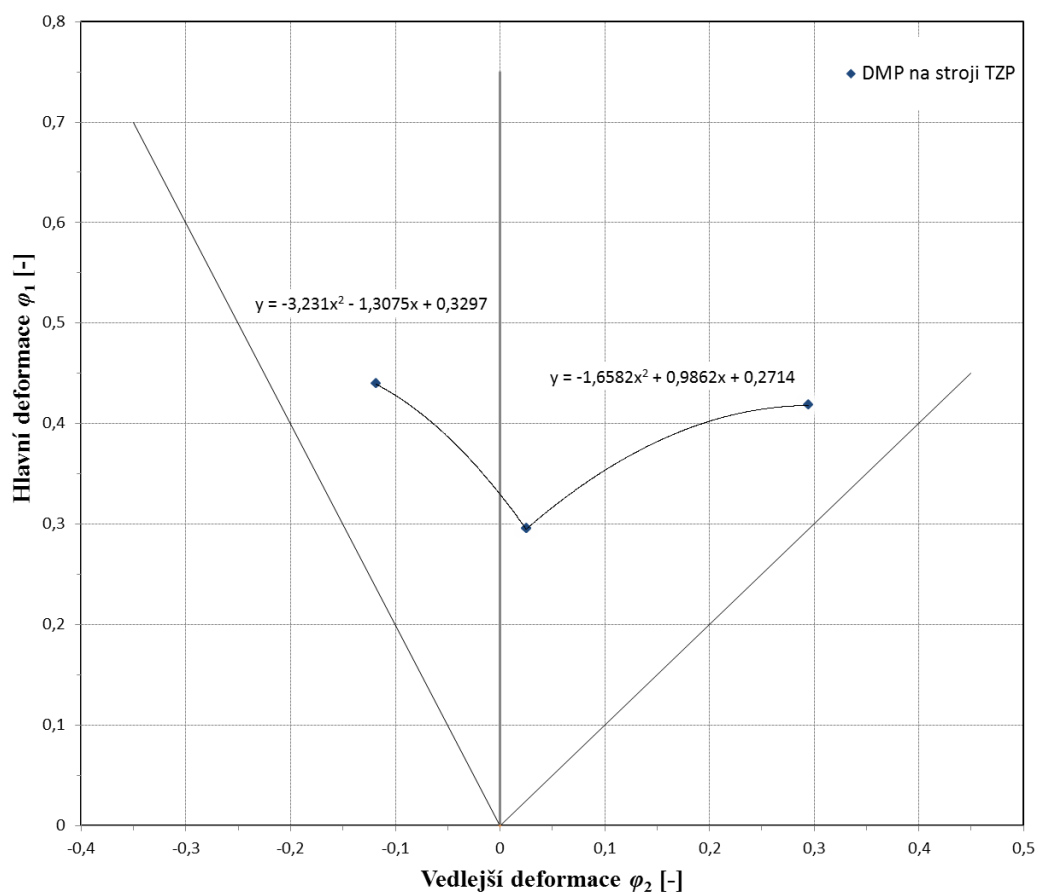
Obr. 3.4.5.1. Průběh rychlosti posuvu tažníku.

3.4.6. Výsledný DMP

V této kapitole bude uvedena tabulka s hodnotami deformace společně se směrodatnými odchylkami (viz. tab. 3.4.6.1.). Dále zde bude uveden výsledný graf (viz. obr. 3.4.6.1.). Vynesené body v grafu byly proloženy regresní křivkou. Opět byla zvolena polynomická funkce druhého řádu pro obě větve DMP. Tímto nám vznikla křivka představující KMP.

Tab. 3.4.6.1. Naměřená data pro tvorbu mini DMP.

Geometrie zkušebních těles b [mm]	Přetvoření φ [-]	Max. naměřená hodnota φ [-]	Mezní def. vypočítaná dle normy φ [-]
8,5	Hlavní deformace φ_1	$0,476 \pm 0,014$	$0,439 \pm 0,008$
	Vedlejší deformace φ_2	$-0,138 \pm 0,011$	$-0,118 \pm 0,007$
35	Hlavní deformace φ_1	$0,327 \pm 0,012$	$0,295 \pm 0,011$
	Vedlejší deformace φ_2	$0,038 \pm 0,010$	$0,025 \pm 0,009$
60	Hlavní deformace φ_1	$0,503 \pm 0,009$	$0,418 \pm 0,006$
	Vedlejší deformace φ_2	$0,315 \pm 0,007$	$0,295 \pm 0,004$



Obr. 3.4.6.1. Graf zobrazující konečný průběh KMP, data získaná pomocí tažníku o průměru 30 mm.

4. DISKUSE A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V rámci experimentálních měření byly sestrojeny dva DMP dle metodiky popsané v kapitolách 3.3. a 3.4. Oba naměřené grafy závislostí mezních deformací jsou vidět na obrázku, kde byly sloučeny do jednoho společného grafu (viz. obr. 4.1.). Pro oba DMP byl testován stejný materiál DC05 ZE 75/75 B P a tudíž by se oba diagramy měly shodovat. Již na první pohled je z výsledků měření vidět, že tento předpoklad neplatí. Rozhodujícím kritériem pro získávání shodných výsledků při zjišťování mezních deformací by bylo dodržení totožných podmínek měření (rychlost deformace, teplota, stav napjatosti, velikost vzorku, tření a průběh snímání). V průběhu realizace experimentu bylo zjištěno, že podmínky u obou metod získávání DMP nebyly totožné. Proto také jak je vidět na porovnávacím grafu se tyto DMP neshodují. Obsahem následujících odstavců bude diskuse k měření.

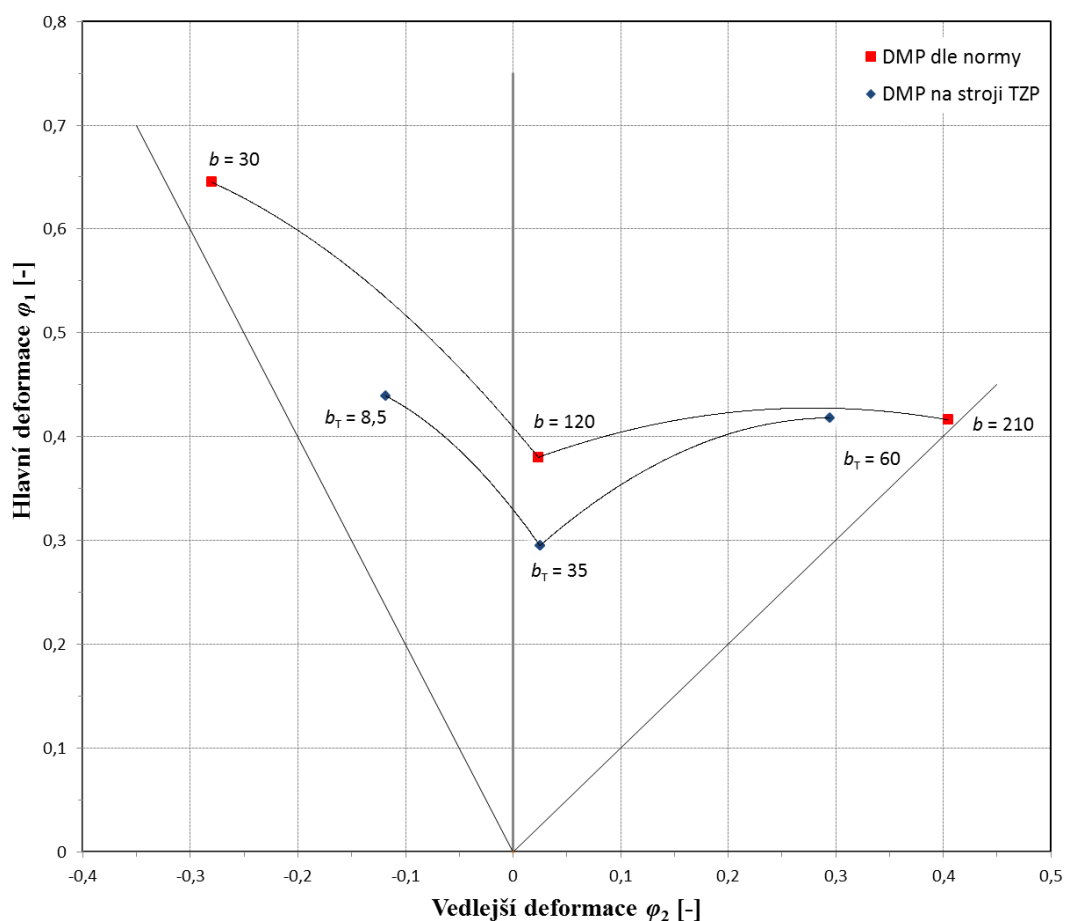
Rychlost posuvu tažníku při zjišťování DMP dle normy [25] je stanovena na $1,5 \pm 0,5$ mm/s. Tato rychlost je nastavována na hydraulickém lisu CBA 300/63 a není problém ji regulovat podle potřeby. Při provádění experimentu byla rychlost posuvu tažníku nastavena na 1 mm/s. Při měření DMP na stroji určeném pro stanovení hlubokotažnosti (TZP) není možné nastavit hodnotu rychlosti posuvu tažníku. Tato rychlost je regulována pouze škrcením výtlačného ventilu na hydraulickém obvodu. I přesto, že byla nastavena nejnižší rychlost, která nám nebyla předem známa, ukázalo se, že po softwarovém změření byla hodnota rychlosti posuvu tažníku 5 mm/s. Tento rozdíl v rychlosti posuvu tažníku měl velký vliv na konečný průběh KMP obzvláště v oblasti levé větve DMP. Z literatury je známo, že rychlost deformace má větší vliv na výsledek právě v oblasti levé větve DMP. Vyšší rychlost tažníku na zařízení TZP je příčinou menšího počtu výstupních snímků pořízených systémem Aramis při snímání. To má negativní vliv na určování výsledného mezního stavu. Nižší počet snímků nemusí zachytit hledaný mezní stav materiálu před vznikem trhliny tak, jak je tomu v případě měření DMP dle normy. Rozdíl rychlostí a stejná frekvence snímání dává k dispozici 5 krát menší počet naměřených snímků při měření pomocí TZP. Rychlost tváření a frekvence snímání je tedy přímo závislá na počtu nasnímaných dat (snímků) v průběhu zkoušky. Nízký počet snímků u měření pomocí TZP se projevil při vyhodnocení zkoušky, kdy bylo nutné v případě přístřihů o šířce 8,5 a 35 mm dopočítat pomocí



programu OriginPro 8 hodnoty hlavních a vedlejších deformací. Při tomto výpočtu se mohly vyskytnout nepřesnosti právě vlivem menšího počtu vstupních dat.

Jako další nezanedbatelný vliv na vzájemnou polohu obou diagramů měla bezesporu rozdílná velikost zkušebních vzorků (přístřihů). Z důvodu použití stejného rozlišení kamer při obou měření byla volena shodná velikost fazetky. Z toho vyplývá, že u větších analyzovaných ploch byl k dispozici větší počet měřených bodů, který byl dán poměrem obou sledovaných ploch. Jelikož bylo pro obě metody nastavené totožné rozlišení snímacích kamer, tak i fazetky byly stejné velikosti. Přístřih o šířce 60 mm je tedy 3,5 krát menší oproti velikosti přístřihu dle normy (šířka 210 mm). Proto měly fazetky použité pro zhotovení průběhu deformace v řezu na přístřihu o šířce 60 mm 3,5 krát větší relativní velikost vůči přístřihu dle normy.

V kapitole 3.3.4. na obrázku 3.3.4.3. bylo zobrazeno vzájemné porovnání naměřených hodnot (pro přístřih o šířce 210 mm) metodou vypínání pomocí tažníku s metodou Bulge testu (vypínání pomocí kapaliny). Tyto hodnoty se v případě hlavní deformace φ_1 lišily o 2 %, v případě φ_2 o 22 %. To mohlo být způsobeno nestejným třením mezi tažníkem a tvářeným plechem, ale také se zde mohl projevit vliv anizotropie materiálu.



Obr. 4.1. Graf zobrazující konečné srovnání DMP pro obě metody měření. Body červeně odpovídají DMP dle normy (šířky přístřihů značeny b [mm]), body modře odpovídají DMP měřeném pomocí TZP (šířky přístřihů značeny b_T [mm]).

5. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo porovnání dvou metod zjišťování mezních stavů deformace optickým bezkontaktním systémem Aramis. V prvním případě se jednalo o metodu určenou normou ISO/DIS 12004-2. V druhém případě se jednalo o metodu měření DMP na zařízení pro stanovení hlubokotažnosti TZP. Toto zařízení prošlo v roce 2011 modernizací v rámci projektu FRVŠ a práce byla zadána s cílem testování možností zařízení, porovnání získaných výsledků a rozhodnutí, zda je tato druhá metoda použitelná pro experimentální zjištění DMP na Katedře strojírenské technologie v Liberci. V případě příznivého výsledku by se jednalo o významné urychlení práce při tvorbě DMP.

První metoda zjišťování DMP podle normy ISO/DIS 12004-2 se prováděla pomocí hydraulického dvojčinného lisu, kdy podmínky, průběh a vyhodnocení experimentu byl v souladu s výše uvedenou normou. Jako druhý způsob pro určení diagramu mezních přetvoření bylo použito zařízení pro určování hlubokotažnosti TZP. Materiál zkoušeného plechu byl pro obě metody stejný. Jednalo se o hlubokotažný elektrolyticky pozinkovaný ocelový plech válcovaný za studena s označením DC05 ZE 75/75 B P.

Pro analýzu deformace u obou metod byl použit optický bezkontaktní měřicí systém Aramis s rozlišením CCD čipu 2M, jeho maximální snímací frekvence byla 6 Hz, která byla v obou případech použita. Pro vyhodnocení naměřených dat byl využit program Aramis v6.3.0.

Získané závislosti mezních deformací pro obě metody byly uvedeny v kapitole 4. (viz. obr. 4.1.), kde jsou zobrazeny ve společném grafu. Po srovnání lze říci, že se takto naměřené DMP značně liší. Tato neshoda byla způsobena odlišnými podmínkami při měření obou metod, mezi které se řadí rychlost tváření a velikost zkušebních vzorků. Diskuze k výsledkům měření je uvedena v kap.4. Při takto nastavených podmínkách měření tedy bylo dosaženo 17,5 krát větší chyby oproti metodě dle normy.

Z experimentálně zjištěných hodnot pro obě metody měření DMP vyplývá, že obě metody se svými výsledky výrazně liší a metoda zjišťování DMP na zařízení TZP není při současné konfiguraci zařízení použitelná pro získávání DMP.

V případě dalších snah o využití zařízení TZP v oblasti zjišťování DMP je nutné toto zařízení rozšířit o možnost regulace rychlosti posuvu tažníku. Menší



rozměr zkušebních vzorků lze kompenzovat použitím snímacího zařízení s vyšším rozlišením, tímto by se zajistila vyšší přesnost při vyhodnocování. Otázkou je, zda by geometrické poměry (malé vzorky) zajistily stejné stavy napjatosti, jako je tomu u vzorků daných normou.



6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DOUBEK, P.: *Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace*. [Disertační práce], TUL, Liberec 2006.
- [2] BILLY, J.: Trendy vývoja ocelových plechov pre ľahké automobilové konštrukcie. *Hutnické listy*, 1999, roč. 54., č. 3.
- [3] GULT, M.: *Hodnocení tvařitelnosti při vysokých rychlostech deformace*. [Bakalářská práce], TUL, Liberec 2009.
- [4] BARTŮŇEK, J.: *Kinetika vzniku plastického lomu u ocelí*. [Diplomová práce], TUL, Liberec 2009.
- [5] POSPÍCHAL, D.: *Využití optického systému ARAMIS při určování mezních stavů deformace hlubokotažného plechu*. [Diplomová práce], TUL, Liberec 2009.
- [6] Fotogrammetrie [online]. Dostupný z [www](http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetrie/): < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Fotogrammetrie/> >, 24. 4. 2012.
- [7] HORÁK, L.: *Zjištění křivek přetvárné pevnosti pomocí optického systému ARAMIS*. [Diplomová práce], TUL, Liberec 2011.
- [8] Měřicí systémy [online]. Dostupný z [www](http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/): < <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/> >, 24. 4. 2012.
- [9] 3D skenery [online]. Dostupný z [www](http://www.mcae.cz/3d-skenery/): < <http://www.mcae.cz/3d-skenery/> >, 24. 4. 2012.
- [10] ARAMIS [online]. Dostupný z [www](http://www.mcae.cz/aramis/): < <http://www.mcae.cz/aramis/> >, 24. 4. 2012.
- [11] PETRUŽELKA, J.: *Tvařitelnost kovových materiálů*. VŠB, Ostrava 2009.
- [12] PONTOS [online]. Dostupný z [www](http://www.mcae.cz/pontos/): < <http://www.mcae.cz/pontos/> >, 24. 4. 2012.
- [13] PONTOS [online]. Dostupný z [www](http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/pontos.html): < <http://www.gom.com/metrology-systems/system-overview/pontos.html> >, 24. 4. 2012.
- [14] ARGUS [online]. Dostupný z [www](http://www.mcae.cz/argus/): < <http://www.mcae.cz/argus/> >, 24. 4. 2012.
- [15] SOBOTKA, J.: *Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů*. [Disertační práce], TUL, Liberec 2008.



- [16] Přednášky z předmětu Experimentální metody tváření: SOLFRONK, P.: Katedra strojírenské technologie - Fakulta strojní, TUL v Liberci, 2012.
- [17] BUCHAR, Z.: *Komplexní analýza přetvoření výlisků nepravidelných tvarů* [Habilitační práce] TU v Liberci 1996
- [18] MACHEK, V.: *Nauka o materiálu 1*, Praha 2000.
- [19] WASSERBAUER, O.: *Modifikace vyhodnocování diagramů mezních přetvoření pro vysokopevnostní materiály pomocí sledování rozložení přetvoření podél měřeného vzorku*. [Diplomová práce], TUL, Liberec 2010.
- [20] ASM HANDBOOK 14B. Sheet metal forming, ASM INTERNATIONAL 2004, ISBN-13:978-0-87170-710-9
- [21] Univerzální stroj pro zkoušení plechů [online]. Dostupný z www: < <http://www.worldoftest.com/sheet142.htm> >, 24. 4. 2012.
- [22] Dodavatel plechů [online]. Dostupný z www: < <http://www.eu.nlmk.com/> >, 24. 4. 2012.
- [23] Dodavatel plechů [online]. Dostupný z www: < <http://www.emw-stahlservice.de/> >, 24. 4. 2012.
- [24] Dodavatel plechů [online]. Dostupný z www: < <http://www.alfun.cz/sortiment/ocel/ocelove-plechy-a-pasy-valcovane-za-studena-elektro> >, 24. 4. 2012.
- [25] ISO/DIS 12004-2. Metallic materials -Sheet and strip - Determination of forming limit curves - Part 2: Determination of forming limit curves in laboratory.
- [26] SIEGRT, K.; WAGNER, S.: *Formability Characteristics of Aluminium Sheet*. Stuttgart: Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, 1994

Prohlášení:

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25. května 2012

.....
Bc. Michal Gult

Declaration:

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 25. May 2012

.....
Bc. Michal Gult